



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

직류 마이크로그리드의  
직렬 아크사고 검출에 관한 연구

Study on Series Arc Fault Detection for  
DC Microgrids

2015년 8월

서울대학교 대학원

전기·컴퓨터공학부

서 갑 수

# 직류 마이크로그리드의 직렬 아크사고 검출에 관한 연구

지도 교수 조 보 형

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함  
2015년 6월

서울대학교 대학원  
전기·컴퓨터공학부  
서 갑 수

서갑수의 공학박사 학위论문을 인준함  
2015년 7월

위 원 장      설   승   기      (인)

부위원장      조   보   형      (인)

위      원      하   정   익      (인)

위      원      이   규   찬      (인)

위      원      임   용   배      (인)

## 초 록

LVDC(Low Voltage Direct Current) 및 MVDC(Medium Voltage Direct Current)를 활용한 직류 마이크로그리드는 다수의 전력원, 에너지 저장장치 및 다양한 전기부하를 효과적으로 연계하는 방안으로 관심을 받고 있다. 직류로 전력망을 구성하게 되면, 교류에 비해 높은 전로 효율 및 전력 변환 효율을 얻을 수 있어 고효율 전력망 구현이 가능하다. 또한, 직류 시스템에서는 교류 시스템의 위상 및 주파수의 동기화도 불필요하게 되어 여러 시스템 구성요소 간 연계를 비교적 쉽게 할 수 있으므로 오늘날 직류는 데이터 센터, 상업용 빌딩 및 산업 단지용 마이크로그리드, 전기 선박 분야에의 응용까지 적극적으로 검토되고 있다.

하지만 직류는 교류와 달리 전압이 50/60 Hz로 영점을 지나지 않기 때문에 전류의 차단이 어렵다는 단점을 가지며, 이는 직류 시스템을 널리 적용하는 데 있어 걸림돌로 작용한다. 교류 시스템은 100여 년간 넓은 영역에 걸쳐 사용되면서 보호 기술이 성숙하였으나, 직류 시스템은 제한된 영역에만 사용됨에 따라 적절한 보호체계가 현재 존재하지 않는다. 따라서 직류의 장점을 극대화하고 응용범위를 넓히기 위해서는 직류의 특성을 고려한 새로운 보호 체계의 개발이 필수적이다.

전력망의 단락, 지락, 아크사고 중 아크사고는 사고의 규모(아크사고의 크기[W])가 단락사고처럼 크지 않아 일반적인 과전류 차단기로는 검출이 어려워서 특히 위험하다. 특히 직렬 아크사고는 병렬 아크사고에 비해 사고로 인한 부하 전류의 변화가 소폭에 불과하여 검출이 더욱 어렵다. 직류에서의 아크는 한번 발생하면 교류보다 자연 소호(Self-extinguish)가 어려워 위험도가 높을 뿐만 아니라, 전로의 어느



지점에서나 발생할 가능성이 있으므로 넓은 범위에 걸쳐 운용되는 마이크로그리드 시스템의 경우 아크사고에 대한 보호는 필수적이다. 대표적인 직류 시스템인 태양광 발전 시스템은 제한된 수의 전력변환장치를 사용하고 확장의 가능성이 작아 시스템 특성을 파악하기 비교적 쉽다. 따라서 태양광 시스템과 같은 비교적 단순한 형태의 환경에서는 노이즈(Noise)에 의한 오작동 확률이 낮은 아크사고 검출이 가능하다. 하지만 직류 마이크로그리드는 다양한 전원, 부하, 저장장치가 전력변환장치를 통해 연계될 뿐만 아니라 지속적인 확장의 가능성이 크기 때문에 시스템 특성을 파악하기 어려워 노이즈에 의한 아크사고 검출기의 오작동 확률이 상당히 높다. 본 논문에서는 직류 마이크로그리드에서 아크사고 보호를 위해 필수적이지만 상당한 기술적 어려움을 가지는 임의의 노이즈에도 오작동 확률이 낮은, 즉 높은 신뢰성을 가지는 아크사고 검출 방법에 대해 논의한다.

본 논문에서는 UL1699B에 의거한 아크 발생기를 이용하여 모의 아크사고 실험을 통해 아크의 전기적인 특성을 분석하여 아크 현상을 이해하고 아크사고 검출에 필요한 아크의 고유한 특징을 분석한다. 직류 마이크로그리드에 적용 가능성이 큰 직류 380 V 조건에서 1.25~5 A의 아크사고 전류 및 0.8~4.0 mm의 전극간격 변화에 따라 나타나는 전기적인 현상을 분석하여 아크사고의 변수 간 상관관계(Correlation)를 도출한다. 이를 통해 아크사고의 평균 전압, 평균 전류, 전극간격 간 밀접한 관계가 있다는 것을 확인한다. 하지만 전력망의 분기에 설치되는 독립된 아크사고 검출기는 전로의 전위와 전류를 측정할 수는 있지만, 임의의 지점에서 발생하는 아크의 전압이나 전극간격을 직접 측정할 수는 없으므로 이러한 특성을 아크사고 검출에 직접 적용하기에는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 아크 전류의 주파수 스펙트럼(Spectrum) 특성을 기반으로 한 아크사고 검출 및 아크사고 규모 추정 가능성에 대해 논의한다. 그에 앞서, 사고 발생 여부에 따른 주파수 스펙트럼 분석을 통해 아크사고 검출에 활용 가능한 주파수 대역에 대해 논의한다. 분석을 통해 주파수 스펙트럼과 아크사고의 규모를 결정하는 아크 전압, 전류, 전력의 상관관계가 매우 낮아서, 전류의 주파수 스펙트럼으로는 아크사고의 규모를 추정하기 어렵다는 결론을 얻는다. 하지만 아크사고의 발생 여부에 따라 주파수 스펙트럼의 변화는 아크사고의 규모와 관계없이 상당히 크기 때문에 이러한 특성을 이용한 아크사고 검출은 가능하다.

본 논문에서는 통계적 방법을 통해 전류의 주파수 스펙트럼을 이용한 아크사고 검출 가능성 및 검출 신뢰성에 대한 논의를 계속하고 이를 통해 아크사고 검출 방법을 도출한다. 정상 상태 및 아크사고에서 주파수 스펙트럼 데이터는 정규 분포(Normal distribution)를 따르는 것으로 볼 때, 통계적 방법을 사용하여 아크사고 검출기의 임계치 및 검출 방법을 설계할 수 있다. 실험에서 측정된 조건별 정상 및 사고 신호의 분포를 통해 상충관계(Trade-off)를 보이는 미검출(아크사고가 발생하였으나 검출하지 못함, False-Negative) 확률과 오검출(사고가 발생하지 않았으나 사고로 오판단, False-Positive) 확률을 적절한 검출 임계치 설정 및 검출방법 설계를 통해 시스템 요구에 맞도록 최적화가 가능함을 보인다.

다음으로 직류 마이크로그리드에 적용 가능한 아크사고 검출방법 도출을 위해 전력변환기의 구동이 아크사고 검출기의 검출 성능에 미치는 영향을 분석하고 이에 대한 대책을 논의한다. 반도체 스위치로 구동되는 전력변환기는 전로에 상당량의 노이즈를 인가하기 때문에 스위칭 주파수

대역의 주파수 스펙트럼을 증가시켜 아크사고 검출기의 오작동 확률을 높인다. 이에 대한 해결책으로 검출기에 인입된 데이터가 창 함수(Window function)를 통해 향상된 해상도를 가지도록 한 후 주파수 스펙트럼에 존재하는 전력변환기 노이즈를 제거하여 아크사고 검출 신뢰성을 향상하는 방법을 제안한다. 제안된 노이즈 억제 방법을 적용한 아크 검출기는 전력변환기의 구동에 영향을 받지 않고 아크사고 검출이 가능하므로 높은 신뢰성이 요구되는 직류 마이크로그리드에 적합하다.

제안된 아크사고 검출 방법의 검증을 위하여 디지털 프로세서(Digital processor)를 이용한 검증용 하드웨어를 구현하고 실험결과 및 분석을 통해 제안된 검출 방법을 검증한다. 먼저, 전력변환기 노이즈가 없는 저항 부하에서의 아크사고 검출 실험을 통해 기본적인 아크사고 검출 성능을 검증한다. 또한, 직류 마이크로그리드의 대표적인 조명용 전력변환기 부하인 발광다이오드 램프 드라이버 구동 조건과 급격한 부하 증가 및 감소 조건에서의 동작실험을 통해 검출기의 오작동 억제 성능을 검증한다. 논문에서 제시한 통계적 분석방법 및 노이즈 억제 방법을 통해 도출된 아크사고 검출기는 99.999%의 높은 아크사고 검출 확률을 가진다. 또한 백만분율(Parts per million)로 나타낸 검출기의 오작동 확률은 미검출 10 ppm, 오검출 270 ppm이다. 본 논문에서 제시한 통계적 방법을 이용한 문제 해결 방법은 아크사고 문제뿐만 아니라, 명확한 해법을 제시할 수 없어 실험 데이터 기반의 접근이 필요한 문제에 대한 실용적인 해법 도출에 활용될 수 있다.

**주요어 :** 직류 보호, 아크사고 검출, 직렬 아크, 직류 마이크로그리드

**학 번 :** 2010-30221

# 목 차

초 록.....	i
기호 및 약어.....	xiv
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구의 배경.....	1
1.2 연구의 목적 및 범위.....	9
1.3 논문의 구성 .....	11
제 2 장 직류 마이크로그리드의 아크사고 .....	13
2.1 아크 및 아크사고.....	13
2.1.1 아크사고의 종류 및 특징.....	14
2.1.2 아크의 발화 특성 및 아크사고 검출 규정.....	17
2.2 아크사고의 전기적인 특성 .....	23
2.2.1 아크의 일반적인 특성.....	24
2.2.2 아크의 DC 특성.....	34
2.2.3 아크의 DC 특성 모델.....	37
2.2.4 아크의 AC 특성.....	42
2.3 요약 .....	57
제 3 장 직류 마이크로그리드 아크사고 검출 .....	61
3.1 일반적인 아크사고 검출 방법 .....	62
3.1.1 광센서를 이용한 방법.....	62
3.1.2 온도 센서를 이용한 방법.....	63

3.1.3	압력의 변화를 감지하는 방법 .....	63
3.1.4	음향신호를 감지하는 방법 .....	64
3.1.5	전기 신호를 감지하는 방법.....	64
3.1.6	아크사고 검출 방법 정리.....	65
3.2	직류 마이크로그리드용 아크사고 검출 방법 .....	65
3.2.1	아크사고 데이터의 정규성 검정 및 정규화.....	67
3.2.2	아크사고 검출 적용 가능성 확인을 위한 t검정 .....	75
3.2.3	통계기법을 이용한 아크사고 검출 방법 도출.....	76
3.2.4	전력변환기가 검출기 동작에 미치는 영향 및 해결방법 .....	83
3.2.5	노이즈에 강인한 아크사고 검출 방법 .....	101
3.3	요약 .....	110
<b>제 4 장</b>	<b>아크사고 검출기의 구현 및 검증.....</b>	<b>112</b>
4.1	직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기의 구현.....	112
4.2	아크사고 검출기의 동작 검증 .....	121
4.2.1	아크사고 검출 성능에 대한 검증.....	121
4.2.2	오작동 억제 성능에 대한 검증 .....	124
4.3	요약 .....	131
<b>제 5 장</b>	<b>결론 및 향후 과제 .....</b>	<b>133</b>
5.1	결론 .....	133
5.2	향후 과제 .....	135
	<b>참고문헌.....</b>	<b>138</b>
<b>부 록</b>	<b>.....</b>	<b>150</b>

A.1 모의 아크사고 실험 데이터 .....	150
A.2 아크사고 변수와 대역별 전류 PSD의 상관관계 .....	161
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>167</b>
<b>감사의 글 .....</b>	<b>171</b>

## 표 목차

표 2.1 UL1699B의 아크 전류, 전압 및 전력에 따른 사고검출시간 .....	21
표 2.2 아크 특성 파악을 위한 실험 조건.....	32
표 2.3 Steinmetz 아크 수식의 상수.....	38
표 2.4 아크 전류 및 전극간격에 따른 아크 전압.....	40
표 2.5 곡선접합을 이용한 실험결과의 아크 모델의 상수.....	40
표 2.6 아크모델의 정확도 수치비교.....	40
표 2.7 $r$ 값에 따른 Pearson 상관계수 해석.....	56
표 2.8 아크 전류의 전력 스펙트럼 밀도와 아크 변수의 상관계수.....	56
표 3.1 실험 데이터(밴드#3)의 정규성 검정 결과 및 변환 방법.....	74
표 3.2 실험 데이터(밴드#3)의 t검정 결과(자유도 59).....	75
표 3.3 아크사고 검출기의 사고 검출 동작 정리.....	77
표 3.4 임계치가 $10^{-5}$ 일 때 1회 동작에 대한 미검출 및 오검출 확률.....	81
표 3.5 검출기 3회 동작에 따른 미검출 및 오검출 확률.....	82
표 4.1 아크사고 검출기 구현을 위한 하드웨어 정보 .....	113
표 4.2 실험 조건에 따른 아크사고 검출시간.....	123
표 4.3 아크사고 검출기 하드웨어의 오작동 확률.....	123

# 그림 목차

그림 1.1 일반적인 마이크로그리드의 구조 [3].	2
그림 1.2 선박용 마이크로그리드의 예 [4].	3
그림 1.3 아크 현상 예: (a) 교류 220 V/800 Ω, (b) 직류 130 V/800 Ω	4
그림 2.1 아크사고의 종류: (a) 직렬 아크, (b) 병렬 아크	15
그림 2.2 차단기의 전류-시간 특성곡선과 아크사고 시 동작영역 [21].	16
그림 2.3 누적된 아크 에너지에 따른 화재 발생률 [46].	18
그림 2.4 직류 아크사고의 발화 및 화재 특성과 UL1699B [50].	20
그림 2.5 UL1699B에 의거한 아크 발생기 [19].	21
그림 2.6 UL1699B에 의거한 직렬 아크 실험 [19].	21
그림 2.7 분기별 아크 검출기를 이용한 직류 시스템 보호	22
그림 2.8 직류 직렬 아크사고(DC Series Arc Fault) 예.	24
그림 2.9 대칭 특성에 의한 아크의 분류 [54].	25
그림 2.10 아크의 구성 및 아크 전압 분포 [55].	26
그림 2.11 고정된 극간 거리에서 아크 전압 및 전류 특성 [55].	26
그림 2.12 아크 발생 전극의 물질변화에 따른 전압-전류 특성 변화 [57].	27
그림 2.13 구리 전극 아크의 극간 거리에 따른 전압-전류 특성 [57].	28
그림 2.14 전극간격에 따른 직류 아크의 전압-전류 관계 [55].	29
그림 2.15 모의 아크 실험용 아크 발생기.	31
그림 2.16 제작된 아크 발생기의 제원.	31
그림 2.17 아크의 전기특성 변화 관찰을 위한 실험 세트	32
그림 2.18 아크 발생 실험 파형(아크 전류: 5 A, 전극간격: 1.6 mm).	33
그림 2.19 전극간격 및 전류 변화에 따른 아크의 등가저항의 변화.	35



그림 2.20 전극간격 변화에 따른 아크 전압-전류 관계.....	35
그림 2.21 전류 및 전극간격 변화에 따른 아크소모 전력 변화.....	36
그림 2.22 아크모델의 전압-전류 특성 곡선 비교.....	41
그림 2.23 아크 발생 실험 파형(전류: 3.75 A, 전극간격: 3.2 mm).....	43
그림 2.24 아크 발생 시 전류 강하 및 아크 전압.....	43
그림 2.25 아크사고 직전의 등가회로.....	44
그림 2.26 아크사고 직후의 등가회로.....	44
그림 2.27 아크 발생 시 전류 강하에 따른 아크 전압 변화.....	46
그림 2.28 전극간격 가변 시 실험 파형.....	47
그림 2.29 시간에 따른 전류의 전력 스펙트럼 밀도 변화.....	49
그림 2.30 2초간의 전류의 전력 스펙트럼 밀도 변화.....	50
그림 2.31 정상상태 및 아크사고 시 PSD의 비교.....	51
그림 2.32 아크 전류 변화에 따른 밴드#3 PSD 변화.....	54
그림 2.33 아크 전압 변화에 따른 밴드#3 PSD 변화.....	54
그림 2.34 아크 전력 변화에 따른 밴드#3 PSD 변화.....	55
그림 3.1 정상상태 데이터(1.25 A/0.8 mm)의 정규성 검정 결과.....	68
그림 3.2 아크사고 데이터(1.25 A/1.6 mm)의 정규성 검정 결과.....	69
그림 3.3 아크사고 데이터(1.25 A, 1.6 mm)의 Box-Cox 분석 결과.....	70
그림 3.4 Box-Cox 변환된 아크사고 데이터(1.25 A, 1.6 mm)의 정규성 검정...70	
그림 3.5 아크사고 데이터(3.75 A, 1.6 mm)의 정규성 검정 결과.....	71
그림 3.6 아크사고 데이터(3.75 A, 1.6 mm)의 Box-Cox 분석 결과.....	72
그림 3.7 Box-Cox 변환된 아크사고 데이터(3.75 A, 1.6 mm)의 정규성 검정...72	
그림 3.8 아크사고 데이터(3.75 A, 1.6 mm)에 대한 Johnson 변환.....	73
그림 3.9 임계치 변화에 따른 아크사고 검출기의 동작.....	76

그림 3.10 정상상태 데이터의 확률분포.....	78
그림 3.11 사고상태 데이터의 확률분포.....	78
그림 3.12 검출 임계치 변화에 따른 미검출 및 오검출 확률.....	79
그림 3.13 실험 데이터를 기반으로 한 검출 임계치 설계.....	80
그림 3.14 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기의 개념도.....	83
그림 3.15 직류 마이크로그리드의 개념도.....	85
그림 3.16 일반적인 전력 변환 회로의 개념적 구조.....	86
그림 3.17 스위칭 특성을 고려한 전력 변환 회로의 AC 등가회로.....	87
그림 3.18 배전선에서 일어나는 아크와 전력변환기의 등가모델.....	88
그림 3.19 아크의 AC 전류 특성을 고려한 Uriarte의 아크 모델 [60].....	90
그림 3.20 DC용 24 W LED 램프 구동 회로의 개념도.....	91
그림 3.21 모델링 검증에 사용된 24 W LED 구동회로.....	91
그림 3.22 PSIM 모의실험에 사용된 직류 LED 램프용 플라이백 회로.....	92
그림 3.23 1차 고조파 근사를 적용하여 단순화한 LED 드라이버 회로.....	92
그림 3.24 LED 드라이버의 모의실험 및 실험결과와 FFT 비교.....	93
그림 3.25 직류 마이크로그리드의 아크 발생 모의실험.....	94
그림 3.26 직류 마이크로그리드 아크사고 모의실험 결과.....	95
그림 3.27 아크사고 발생에 따른 전류의 전력 스펙트럼 밀도.....	98
그림 3.28 Hamming 창 함수.....	99
그림 3.29 Hamming 창 함수의 주파수 응답 [95].....	99
그림 3.30 Hamming 창 함수 적용 후 10 kHz 사인함수의 주파수 특성.....	100
그림 3.31 아크사고 검출 과정.....	101
그림 3.32 제안된 아크사고 검출 방법.....	103
그림 3.33 데이터 프로세싱 적용에 따른 주파수 스펙트럼 비교.....	106

그림 3.34 데이터 프로세싱 횟수에 따른 PSD 평균 변화.....	107
그림 3.35 데이터 프로세싱에 따른 주파수 스펙트럼 평균값 감소.....	108
그림 3.36 저항부하(700 W)에서 아크사고 데이터 프로세싱.....	108
그림 3.37 부하 연동 중 아크사고 시 데이터 프로세싱.....	109
그림 3.38 데이터 프로세싱에 따른 스펙트럼 평균값 변화.....	110
그림 4.1 제안된 아크사고 검출기의 하드웨어 개념도.....	112
그림 4.2 프로토타입에 사용된 전류 변압기의 주파수 이득.....	113
그림 4.3 전류 변압기 및 전류-전압 변환 회로.....	114
그림 4.4 대역 통과필터 구성#1: 고역 통과 필터( $f_{ch}$ : 40 kHz).....	114
그림 4.5 대역 통과 필터 구성#2: 저역 통과 필터( $f_{cl}$ : 100 kHz). ....	115
그림 4.6 ADC 입력 전 이득 조정 회로.....	115
그림 4.7 설계된 대역 통과 필터의 이득.....	116
그림 4.8 전류의 전력 스펙트럼 밀도의 평균값에 대한 최대값의 배수.....	117
그림 4.9 아크사고 검출기 하드웨어.....	119
그림 4.10 아크사고 검출기 시제품 회로의 앞면.....	120
그림 4.11 아크사고 검출기 시제품의 뒷면.....	120
그림 4.12 아크사고 검출기의 동작 시험(부하 1.25 A, 전극간격 0.8 mm).....	122
그림 4.13 데이터 프로세싱 적용 전 아크사고 검출기 동작.....	125
그림 4.14 LED 드라이버 구동 시 전류의 전력 스펙트럼 밀도.....	125
그림 4.15 제안된 아크사고 검출기의 동작.....	126
그림 4.16 데이터 프로세싱 후 LED 드라이버 전류 PSD의 확률 분포.....	127
그림 4.17 부하의 급격한 상승 시 주파수 스펙트럼.....	128
그림 4.18 부하의 급격한 증가에 따른 검출기 동작.....	129
그림 4.19 부하의 급격한 감소에 따른 검출기 동작.....	130

그림 4.20 직류 PC 구동 시 검출기 동작.....	131
--------------------------------	-----

## 기호 및 약어

AC: Alternating Current, 교류

ADC: Analog-to-Digital Converter, 아날로그-디지털 변환기

AFD: Arc Fault Detector, 아크사고 검출기

AFG: Arc Fault Generator, 아크사고 발생기

BCM: Boundary Conduction Mode, 임계 도통 모드

BPF: Band Pass Filter, 대역 통과 필터

CCM: Continuous Conduction Mode, 연속 전류 모드

CHP: Combined Heat and Power

CPL: Constant Power Load

DC: Direct Current, 직류

DER: Distributed Energy Resource, 분산 전원

DFT: Discrete Fourier Transform, 이산 푸리에 변환

DG: Distributed Generation, 분산 발전

DP: Data Processing, 데이터 처리

DS: Distributed Storage, 분산 저장장치

DSP: Digital Signal Processor, 디지털 신호 처리기

ECDF: Empirical Cumulative Distribution Function,

경험적 누적 분포 함수

EMI: Electromagnetic Interference

FFT: Fast Fourier Transform, 고속 푸리에 변환

FHA: First Harmonic Approximation, 1고조파 근사

GIU: Grid Interface Unit, 계통 연계 유닛

HPF: High Pass Filter, 고역 통과 필터

ID: Interrupting Device, 차단 스위치

IEC: International Electrotechnical Commission, 국제전기표준위원회

LED: Light Emitting Diode, 발광 다이오드

LIU: Load Interface Unit, 부하 연계 유닛

LPF: Low Pass Filter, 저역 통과 필터

LVDC: Low Voltage Direct Current, 저전압 직류

MVDC: Medium Voltage Direct Current, 중전압 직류

NEC: National Electric Code, 미국 전기 기술 기준

NTC: Negative Temperature Coefficient

PCB: Printed Circuit Board, 인쇄 회로 기판

PCC: Point of Common Coupling

PSD: Power Spectral Density, 전력 스펙트럼 밀도

PWM: Pulse Width Modulation, 펄스 폭 변조

RIU: Renewable Interface Unit, 신재생 에너지 연계 유닛

RMS: Root Mean Square, 실효값

RMSE: Root Mean Square Error, 실효값 에러

SIU: Storage Interface Unit, 저장장치 연계 유닛

SSE: Sum of Squares due to Error, 에러 제곱합

SSR: Sum of Squares due to Regression

SST: Sum of Squares Total

ZVS: Zero Voltage Switching, 영 전압 스위칭

$D_{mean}$  : 전류의 전력 스펙트럼 밀도의 평균 [ $A^2$ ]

$D_{psd}$ : 전류의 전력 스펙트럼 밀도 [ $A^2$ ]  
 $D_{max}$ : 전류의 전력 스펙트럼 밀도의 최대값 [ $A^2$ ]  
 $d$ : 전극간격 [mm]  
 $E_s$ : 전력 스펙트럼 밀도 합 [ $A^2$ ]  
 $F_a$ : 평균화된 전력 스펙트럼 밀도 [ $A^2$ ]  
 $f_{cH}$ : 고역 통과 필터의 차단 주파수 [Hz]  
 $f_{cL}$ : 저역 통과 필터의 차단 주파수 [Hz]  
 $\Delta I_{arc}$ : 아크 발생 시 전류 변화량 [A]  
 $e_{gap}$ : AC 아크 모델의 가변 전압원 [V]  
 $\hat{i}_{ac}$ : 전력변환기 입력전류의 AC 성분 [A]  
 $I_{arc}$ : 아크 전류의 평균값 [A]  
 $i_{arc}$ : 순시 아크 전류 [A]  
 $\hat{i}_{arc}$ : 순시 아크 전류의 AC 성분 [A]  
 $i_{dc}$ : 배선 전류 [A]  
 $I_{in}$ : 전력변환기 입력전류의 DC 성분 [A]  
 $I_{in}^*$ : 아크사고 발생 후 전력변환기의 변형된 입력 전류 [A]  
 $i_{in}$ : 전력변환기의 입력 전류 [A]  
 $i_{in}^*$ : 아크사고 발생 후 전력변환기의 입력 전류 [A]  
 $k_1$ : 데이터 프로세싱 판단 상수  
 $k_2$ : 데이터 평균화 길이 결정 상수  
 $k_3$ : 데이터 누적 상수  
 $K_m$ : 아크 검출 임계치 [ $A^2$ ]  
 $m$ : 전력 스펙트럼 밀도의 최대값의 위치 인덱스  
 $N$ : 전력 스펙트럼 밀도 데이터 개수

$P_{arc}$  : 아크사고의 전력 [W]

$P_{in}$  : 전력변환기의 입력 전력 [W]

$R_{arc}$  : 아크 등가 저항 [ $\Omega$ ]

$R_{eq}$  : 전력변환기의 출력 등가 저항 [ $\Omega$ ]

$R_{gap}$  : AC 아크 모델의 아크 가변 등가 저항 [ $\Omega$ ]

$R_L$  : 부하 등가 저항 [ $\Omega$ ]

$r_{xy}$  : Pearson 상관계수

$S_x$  : 분산(Variance)

$S_{xy}$  : 공분산(Covariance)

$T$  : 전극의 끓는점 [K]

$T_p$  : 샘플링 주기 [s]

$T_{trip}$  : 아크사고 검출 요구 시간 [s]

$V_{arc}$  : 아크 전압의 평균값 [V]

$v_{arc}$  : 순시 아크 전압 [V]

$V_{DC}$  : 직류 배선 전압 [V]



# 제 1 장 서론

## 1.1 연구의 배경

LVDC(Low Voltage Direct Current) 및 MVDC(Medium Voltage Direct Current)를 활용한 직류 마이크로그리드는 신재생 에너지, 저장장치를 비롯한 다수의 분산전원(Distributed Energy Resource, DER)을 연계하는 효과적인 방안으로 관심을 받고 있다. 전력망 구성에 직류를 사용하게 되면 교류에 비해 같은 전압을 사용할 때 동일한 전로로 더 많은 전력을 송배전 할 수 있을 뿐만 아니라 전력전자 기술을 통해 전력변환 효율을 높일 수 있어 고효율 전력망 구현이 가능하다. 또한, 직류 시스템은 교류 시스템에서 요구되는 위상, 주파수의 동기화 필요성이 없어 시스템 구성요소간 인터페이스를 간략화할 수 있다는 장점을 가진다. 이러한 장점으로 인해 오늘날 직류는 데이터 센터, 상업용 빌딩 및 단지용 마이크로그리드뿐만 아니라 최근에는 선박에 이르기까지 다양한 분야에 응용이 검토되고 있다 [1, 2]. 그림 1.1과 그림 1.2는 각각 일반적인 마이크로그리드의 구조와 선박용 마이크로그리드의 예이다 [3, 4].

직류 시스템은 위상, 주파수 동기화가 필요하지 않다는 장점을 가지지만, 전압, 전류가 영점을 교번하지 않아 전류의 차단이 어려워 시스템의 보호 측면에서 단점을 가진다. 또한, 교류 시스템은 100 년 넘게 적용되어 오면서 보호시스템에 대한 개념이 정착되었으나 직류 시스템은 상대적으로 제한된 영역에서만 사용되어 왔기 때문에 보호에 대한 개념이 정착되지 않았으며 그 결과 직류용 표준, 상용제품 및

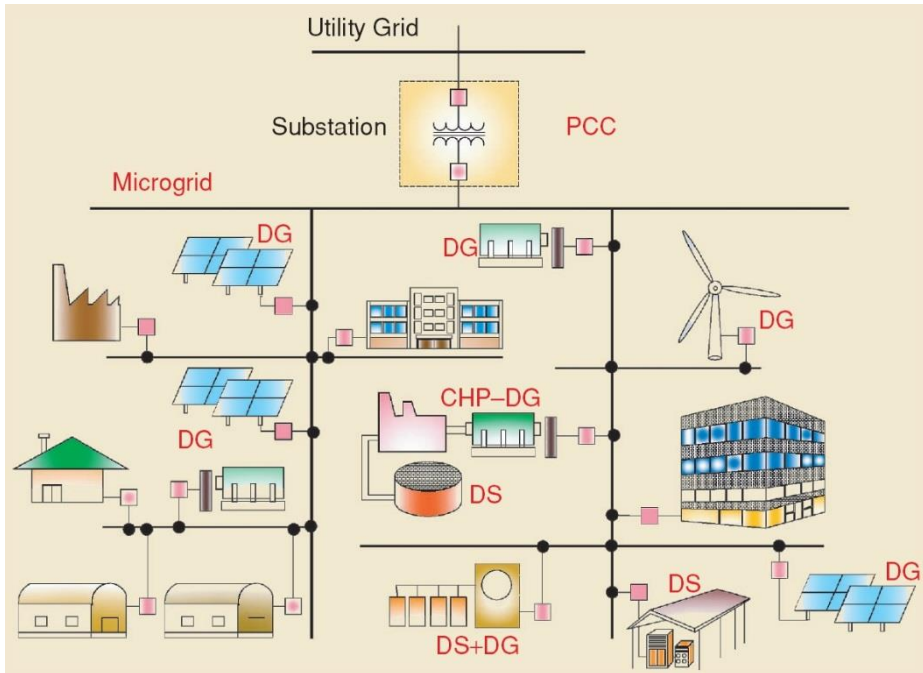


그림 1.1 일반적인 마이크로그리드의 구조 [3].

보호장비가 부족한 상황이다. 따라서 직류의 다양한 장점을 활용하여 폭넓게 적용하기 위해서는 직류 전력망에서의 사고 보호에 대한 연구가 선행되어야 한다 [5-8].

직류 전력 시스템에서 보호가 필요한 사고는 단락사고(Short circuit fault), 지락사고(Ground fault), 아크사고(Arc fault)로 분류할 수 있다 [7, 9]. 단락사고는 가장 일반적인 사고 형태로서, 전력변환기를 통해 직류 배선에 연결되는 시스템 구성요소의 특성 및 차단기와 같은 보호장비들의 특성을 파악하여 직류 마이크로그리드 환경에 적합한 보호 시스템을 구축하기 위한 활발한 연구가 이루어지고 있다 [10, 11]. 지락사고는 충전부(Live part)가 대지와 접촉하며 발생하는 사고로 시스템의 접지와 관련이 깊다. 지락사고는 시스템 및 사용자의 안전과

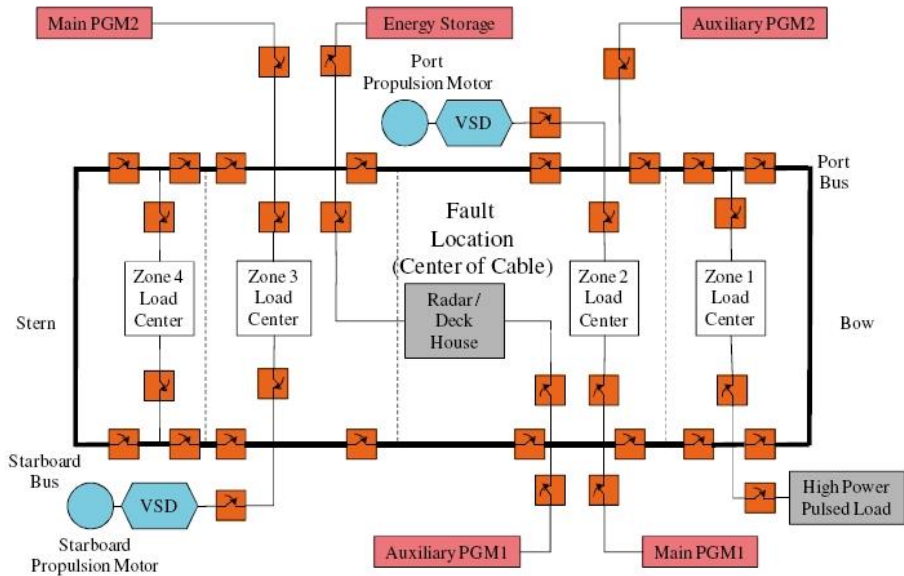
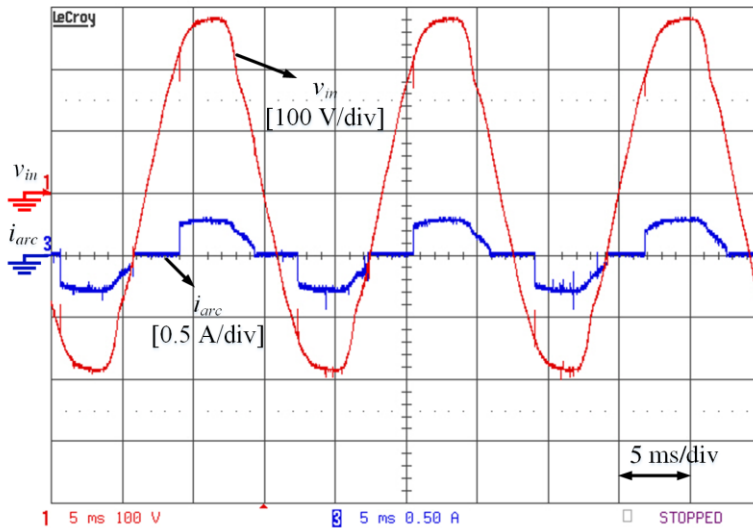


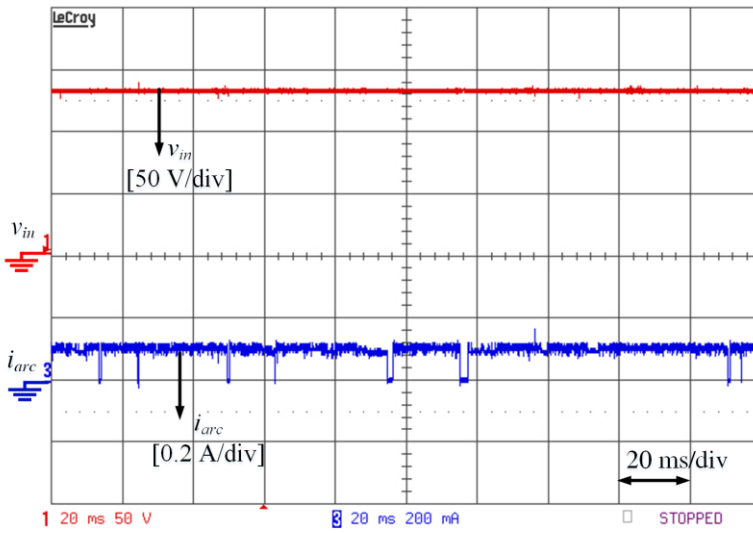
그림 1.2 선박용 마이크로그리드의 예 [4].

밀접한 관련이 있기 때문에 시스템의 사용전압, 절연 여부 및 사고전류 등을 고려하여 보호 시스템을 설계하여야 한다 [12].

아크사고는 전로의 손상이나 노화, 커넥터(Connector)의 느슨해짐 등으로 인해 발생한다. 아크사고가 발생하면 신속하게 조치하지 않을 경우 아크에서 발생하는 높은 에너지로 인해 화재 사고가 발생할 수 있으며 이로 인해 심각한 인명 및 재산피해를 일으킬 수 있으므로 아크사고에 대한 대책이 필요하다. 그림 1.3에 보인 것처럼 교류에서 아크는 전압이 영점을 주기적으로 지나기 때문에 전류의 차단이 쉬워 자체 소호(Self-extinguish)될 가능성이 비교적 크지만, 직류 아크는 전류에 영점이 형성되지 않기 때문에 자연 소호가 어렵고 따라서 교류에 비해 큰 사고로 이어질 확률이 높아 더 위협적이다. 그림 1.3의 파형은 부하에 교류 전원과 직류 전원을 인가하고 부하와 전원 사이에 아크를



(a)



(b)

그림 1.3 아크 현상 예: (a) 교류 220 V/800  $\Omega$ , (b) 직류 130 V/800  $\Omega$ .

발생시켜 얻은 파형이다. 아크사고는 단락사고에 비해 큰 사고전류를 발생시키지 않아 심각성이 크게 드러나지 않았지만, 최근 태양광 시스템의 노화에 따른 아크 화재 사고가 빈번하게 발생하면서 주목을

받고 있다 [13, 14]. 대표적인 직류 시스템인 태양광 발전 시스템의 화재사고는 신재생 에너지의 보급이 급격하게 증가하고 동시에 사용연수 10 년 이상의 노후 시설이 많아짐에 따라, 시스템 구성요소들 간의 전기적인 접속에 문제가 발생하고, 이로 인해 유발된 아크가 화재의 한 원인으로 지적된다 [15]. 태양광 시스템에서 화재사고가 지속해서 발생하면서 직류 아크사고에 대한 위험성이 관심을 불러일으켰다 [16, 17]. 아크사고에 대한 대책으로 미국은 2011년 NEC(National Electric Code) 규정 690.11에 80 V 이상을 사용하는 태양광 시스템의 아크사고 검출 장치 설치에 대한 내용을 추가하였다 [18]. NEC 690.11을 바탕으로 제정된 UL1699B는 태양광 시스템에 필요한 아크사고 검출 및 차단장치의 검증 및 인증에 이용된다 [19]. 직류 마이크로그리드에서 시스템의 모든 구성요소는 직류링크에 연계되어 운용되고 직류 배선 전압은 수백 V에서 수 kV로 태양광 시스템과 비슷한 수준 또는 더 높은 전압으로 운용될 가능성이 크므로 직류 아크사고에 대한 보호 대책 마련이 필수적이다 [20].

아크사고의 형태는 크게 직렬 아크와 병렬 아크, 두 가지로 분류된다. 직렬 아크는 전류가 정상적으로 흘러야 할 전로 또는 접점에 접속이 약해지면서 발생하는 아크사고이며, 병렬 아크는 전기적인 접속이 의도되지 않은 두 전로 또는 접점 사이에 절연이 약해져 아크 전류가 흐르게 되면서 일어나는 사고이다. 병렬 아크는 전위가 서로 다른 도선 간에 발생하기 때문에 단락전류에 근접하는 큰 전류를 순간적으로 발생시키며, 따라서 과전류 차단기에 의해 검출되어 보호될 확률이 비교적 높다 [21]. 이에 반해 직렬 아크는 임피던스가 아주 낮게 유지되어 배선 손실이 최소화되어야 할 전로에 전기적인 접속이

약해지면서 전력전달 경로에 부하와 직렬로 임의의 임피던스가 삽입되는 형태로 발생한다. 따라서 직렬 아크사고가 발생하면 저항성 부하의 경우 단락사고나 지락사고처럼 정상부하보다 사고전류가 크게 증가하지 않고 오히려 감소하며, 다른 형태의 부하의 경우에도 사고와 부하가 직렬이기 때문에 사고전류가 제한되어서 정상전류와 큰 차이를 발생시키지 않는다. 이러한 이유로 직렬 아크사고에서는 사고가 발생했음에도 불구하고 전류의 크기가 정상동작 범위 내에 있으므로 일반 과전류 차단기로는 검출이 어렵다. 따라서 직렬 아크사고에 대한 보호를 위해서는 계통 내에 별도의 아크사고 검출기가 필요하며, NEC는 현재 80 V 이상의 태양광 발전 시스템에 직렬 아크사고 검출이 가능한 아크사고 검출기(AFD, Arc Fault Detector)를 설치하도록 규정하고 있다 [18].

아크사고 검출기는 전력망에서 발생하는 아크사고로부터 시스템의 안전을 도모하기 위해 설치 운영되며, 미국의 경우 NEC, 유럽의 경우 IEC(International Electrotechnical Commission, 국제전기표준위원회) 규정이 제정·적용된다. 아크사고 검출에서 사고 검출 정확도 및 오작동(Nuisance tripping) 억제가 주요 성능 평가 요소이다 [19, 22]. 아크사고는 발생 후 일정 시간 이내에 차단하지 않으면 화재 사고를 발생시킬 수 있으므로 UL1699B는 아크사고의 규모(아크사고의 크기[W])에 따라 0.8초에서 2초의 아크사고 검출 시간을 제시하고 있다. 또한, UL1699B는 아크사고의 위험성을 고려하여 일단 아크사고가 검출되어 차단기가 동작하면 사람이 직접 복전할 경우에만 전원이 복구되도록 한다 [19]. 정상상태에서의 오작동은 사용자의 불편뿐만 아니라 운영자의 이윤을 감소시키고 유지보수 비용을 증가시키기 때문에 시스템의 효율성 증대를 위해 아크사고 검출기의 오작동 억제는 상당히

중요하다. 여러 구성요소가 연동되는 직류 마이크로그리드 또한 효율성 증대를 위해서는 신뢰성 높은 아크사고 보호 기법이 필수적이다.

아크는 빛, 소리, 진동 등을 동반하기 때문에 아크사고 검출 방법으로 여러 기법이 사용될 수 있다. 하지만 아크 현상으로 인해 발생하는 비전기적 변화를 감지하여 아크사고를 검출하는 종래의 방법들은 주변 환경의 영향에 취약하여 오작동 확률이 높아 넓은 영역에 걸쳐 운용되는 직류 마이크로그리드에는 적용하기 어렵다 [23]. 반면, 아크사고로 인한 전기적인 변화를 감지하여 사고를 검출하는 방법은 빠른 검출이 가능할 뿐만 아니라 전기신호의 전도성(Conductivity)을 이용하여 넓은 범위에 걸쳐 적용될 수 있으므로 마이크로그리드 적용에 적합한 방법이다 [24]. 아크사고가 발생하면 해당 전로의 전압과 전류에 변화가 발생하기 때문에, 정상동작에서 나타나는 전기적인 특성과 아크사고에서 나타나는 특성을 분리해 내면 아크사고 검출이 가능하다.

아크사고 검출 방법은 크게 시간 영역의 데이터 해석을 통한 검출법과 주파수 영역에서의 스펙트럼(Spectrum) 분석을 통한 방법으로 나눌 수 있다. 시간 영역에서의 데이터를 통해 아크사고를 검출하는 대표적인 방법으로 교류 전류의 영점 영역이 길어져서 Shoulder가 생기는 것을 감지하는 방법, 고조파의 변화를 감지하는 방법, 역률(Power factor)의 변화를 감지하는 방법 등이 있다 [25–27]. 이러한 방법들은 교류 시스템에서 존재하는 파라미터(Parameter)를 감지하는 방법으로 직류 시스템에 적용하기에는 한계가 있다. 직류에서 사용 가능한 시간 영역 데이터의 특성변화를 이용한 방법으로 전류의 직류성분을 제외한 교류성분의 실효값(RMS, Root Mean Square) 변화를 감지하여 아크사고를 검출하는 방법이 있다 [28]. 전류에 나타나는 RMS 변화를

감시하여 아크사고를 검출하는 방법은 시스템의 구성이 단순하고 사용되는 장비들의 특성이 파악되는 조건에서 효과적이다. 하지만 알려지지 않은 부하가 연결될 수 있는 마이크로그리드 환경에 적용하기에는 한계가 있다. 이러한 방법은 다양한 구성요소가 전력변환기를 통해 직류배선에 연결되어 운영되는 직류 마이크로그리드 환경에서 노이즈(Noise)에 취약하므로 오작동 확률이 매우 높다 [29].

아크사고에서 나타나는 신호의 주파수 영역 특성 변화를 이용한 사고 검출 방법으로 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform)을 통한 방법이 대표적이다 [23]. 아크사고는 핑크 노이즈(Pink noise) 특성을 가져 전로의 전압, 전류의 주파수 성분을 넓은 대역에 걸쳐 증가시킨다. 이러한 현상을 이용한 아크사고 검출법은 전류 변압기 등을 이용하여 전로 전류의 교류 성분을 감시하기 때문에 교류나 직류 시스템에 제한 없이 적용할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 주파수 특성의 변화를 이용하여 아크사고를 검출하는 대표적인 예로 태양광 발전 시스템에 사용되는 태양광 아크사고 검출기가 있다 [30, 31].

하지만 직류 마이크로그리드 시스템에서 아크사고 검출은 앞서 언급된 태양광 시스템과 같은 비교적 단순한 환경에서의 사고 검출에 비해 많은 어려움을 가진다 [32]. 직류 마이크로그리드 환경의 아크사고 검출에서 가장 어려운 문제는 어떻게 아크사고 검출의 신뢰도를 향상하고 동시에 오작동을 억제하는가 하는 것이다. 기존의 아크사고 검출방법은 일반주택, 태양광 단지 등으로 제한된 영역에서 운용되는 시스템을 대상으로 하므로 시스템이 비교적 단순하다. 이러한 시스템은 전력망의 구성이 간단하고 구성요소 또한 쉽게 파악할 수 있으며 확장의 가능성이 작아서 비교적 단순한 알고리즘 만으로 시스템의 보호가 가능하다 [33]. 또한, 태양광



인버터 등 검출장치의 성능에 영향을 줄 가능성이 있는 요인들은 사전에 파악이 가능하므로 학습 알고리즘 등을 이용하면 고성능의 아크사고 검출이 가능하다 [30]. 이처럼 단순한 시스템에서의 아크사고 검출은 외부환경의 영향이 비교적 적고, 외부환경의 영향이 있더라도 예측할 수 있기 때문에 오작동 억제가 비교적 쉽다.

이에 반해, 계통, 분산전원 및 부하가 다양한 전력변환기를 통해 연계되는 직류 마이크로그리드 환경에서의 아크사고 검출은 검출 성능에 영향을 줄 수 있는 외부요인이 많을 뿐만 아니라 확장의 가능성 또한 높아 검출 신뢰성 확보 및 오작동 억제에 상당한 어려움을 가진다 [34]. 따라서 복잡도 및 확장 가능성이 큰 직류 마이크로그리드 시스템의 아크사고 보호를 위해서는 전력변환기의 노이즈에 강인한, 즉 높은 신뢰성을 가지는 아크사고 검출 방법이 필요하다 [20, 35–37].

1.1에서는 미래 전력망 구성방법으로 많은 관심을 받는 직류 마이크로그리드 시스템의 넓은 응용을 위해서 필수적인 안전성 확보 방안에 대해 논의하였다. 특히 단락사고 및 지락사고에 비해 검출의 어려움을 가져 위협적인 아크사고의 개념 및 사고 검출방법에 대해 논의하였다. 복잡성과 확장 가능성이 큰 직류 마이크로그리드에서 기존의 단순한 아크사고 검출방법의 적용이 어려움을 확인하고, 높은 신뢰성을 가지는 새로운 아크사고 검출방법이 요구됨을 확인하였다.

## 1.2 연구의 목적 및 범위

본 논문은 직류 마이크로그리드 시스템의 안전성 확보를 위해 필수적인 아크사고의 검출에 대해 논의한다. 신뢰도가 높은 아크사고 검출 방법을

도출하기 위해서는 먼저 아크사고에서 나타나는 신호의 전기적인 특성을 파악해야 한다. 본 연구에서는 직류 마이크로그리드의 아크사고를 모의하기 위하여 아크 발생기를 제작하였다. 제작한 아크 발생기를 이용한 모의실험을 통해, 아크 전류 및 전극간격의 변화에 따라 전로에서 나타나는 아크 신호의 전기적인 특성을 DC 성분과 AC 성분으로 나누어 분석한다. 여기서 DC 성분은 대상 신호의 평균값을, AC 성분은 대상 신호에서 평균값을 제외한 성분을 말한다. 아크사고가 발생한 전로에서 관측되는 신호의 DC 성분에서 나타나는 변수 간의 관계를 통해 아크의 기본적인 특성을 이해하고, 이를 아크사고 검출에 활용할 수 있는 방안에 대해 논의한다.

DC 성분 분석에 이어, 아크사고가 발생한 전로에 흐르는 전류의 AC 성분 분석을 통해 아크사고 규모의 예측 가능성에 대해서 논의한다. 전류의 AC 성분 분석은 고속 푸리에 변환을 통해 얻어지는 전류의 전력 스펙트럼 밀도(PSD, Power Spectral Density)를 통해 수행한다. 본격적인 논의에 앞서 아크의 전기적 특성 분석에 용이한 주파수 대역에 대해서 먼저 논의한다. 주변 환경의 변화에 영향이 적고 아크사고 발생에 따라 뚜렷한 변화가 관측되는 주파수 대역에서 AC 성분 변화에 대한 통계적 분석을 통해 높은 신뢰성을 가지는 아크사고 검출 방법에 대해 논의한다. 통계적 방법을 이용하여 아크사고 검출기의 임계치 변화에 따른 미검출(아크사고가 발생하였으나 검출하지 못함, False-Negative) 및 오검출(사고가 발생하지 않았으나 사고로 오판단, False-Positive) 확률을 도출하고 추가적인 기법을 통한 검출 확률 개선에 대해서 논의한다.

직류 마이크로그리드 환경에서 아크사고의 주파수 특성에 기반을 둔

아크사고 검출기의 동작에 영향을 줄 가능성이 큰 전력변환기의 구동에 대해 논의한다. 전력변환기는 스위칭(Switching) 주파수 대역에 해당하는 전류의 전력 스펙트럼 밀도를 증가시켜 아크사고 검출기의 오작동을 유발하게 된다. 본 논문에서는 전력변환기의 노이즈 특성을 분석하여 노이즈 억제 방법을 도출하고, 이를 아크사고 검출기의 알고리즘에 적용함으로써 검출기의 신뢰성을 향상하는 방안에 대해 논의한다. 그리고 한정된 기저벡터를 가지는 이산 푸리에 변환(DFT, Discrete Fourier Transform)의 특성상 나타나는 주파수 스펙트럼의 해상도 저하를 보완할 수 있는 창 함수(Window function)의 적용에 대해 논의한다. 본 논문은 창 함수의 적용과 더불어 노이즈 억제 기술을 통해 전력변환기 노이즈에 강인한 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기를 제안한다. 그 후 통계적 검정을 통해 제안된 아크사고 검출 방법이 높은 수준의 사고 검출 및 오작동 억제 성능을 가짐을 검증한다. 또한, 제안된 사고 검출 방법이 적용된 프로토타입 구현을 통해 제안된 아크 검출법의 실효성을 보인다.

### 1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 아크사고의 개념 및 전기적인 특징에 대해 논의한다. 또한, 모의 아크 실험을 통해 아크의 DC 성분 및 AC 성분에서 나타나는 전기적인 특성을 분석하여 아크 현상을 이해하고 이를 통한 아크사고 검출 방안에 대해 논의한다. 3장은 아크 신호의 AC 특성을 기반으로 한 아크사고 검출기의 검출 임계치 변화에 따른 신뢰성을 통계적 방법을 이용하여 분석하여 시스템 요구사항에 부합하는

임계치 결정에 대해 논의한다. 또한, 검출기의 오작동을 일으키는 전력변환기의 노이즈로부터 강인한 새로운 아크사고 검출 방법을 제안한다. 4장은 제안된 아크사고 검출 방법을 하드웨어로 구현하고 통계적 방법을 통해 도출된 임계치 및 검출 파라미터를 적용한다. 또한, 실험을 통해 제안된 방법의 효용성을 검증한다. 5장은 본 논문에서 논의한 내용에 대한 결론을 맺고 추가로 필요한 향후 과제에 대해 논의한다.

## 제 2 장 직류 마이크로그리드의 아크사고

2장에서는 직류 마이크로그리드의 아크사고에 대해 논의한다. 먼저 아크사고의 기본 특성에 대해 논의한 후, 본 논문에서 집중적으로 다룰 직렬 아크에 대한 심화된 논의를 계속한다. 또한, 아크의 발화특성에 기반을 둔 아크사고 검출 규정에 대해 검토함으로써 직류 마이크로그리드 시스템에 필요한 아크사고 검출에 대해 논의한다. 이어서 아크 발생기를 이용한 모의 아크사고 실험을 통해 아크사고의 전기적인 특성을 분석한다. 특히 아크의 전류와 전극간격의 변화에 따라 사고상태에서 나타나는 아크의 전압, 전류, 등가 저항 간의 관계에 집중함으로써 아크현상을 전기적으로 분석한다. 아크의 전기적인 특성 분석은 아크사고에서 나타나는 전압, 전류 평균치의 거동에 초점을 맞춘 DC 특성 분석과, 신호의 평균치를 제외한 교류성분의 주파수 특성 변화에 초점을 맞춘 AC 특성 분석으로 나누어 진행한다. 아크의 AC 특성 분석은 아크 전류의 고속 푸리에 변환을 통해 얻어지는 전력 스펙트럼 밀도를 통해 수행하며, 분석대역 스펙트럼 총합의 변화와 DC 특성 간의 상관관계에 대해서 분석하여 아크사고 규모 예측 가능성에 대해서 논의한다. 또한, 아크사고 발생에 따른 전로 전류의 AC 특성 변화를 기반으로 한 아크 검출의 가능성에 대해서 통계적인 접근을 시도한다.

### 2.1 아크 및 아크사고

아크는 아크방전의 약어로 두 전극에 전위차가 발생하여 전극 사이의 기체에 지속해서 발생하는 빛을 동반한 방전으로 절연 파괴의 일종이다.

아크사고는 의도하지 않은 아크의 발생을 의미하며, 이러한 아크가 지속해서 발생하게 되면 화재사고의 원인이 된다 [38]. 아크사고는 전선 또는 커넥터의 손상, 절연 파괴, 과부하, 부식 등으로 인해 전로에 의도되지 않은 결함이 생기면 발생할 수 있다 [39]. 또한, 아크사고는 전력시스템의 운영에 따라 설치의 오류 및 시스템의 노화, 의도되지 않은 사고에 의해 발생하여 화재사고를 일으켜 인명 및 재산피해를 발생시킬 수 있으므로 사고에 대한 대비가 필요하다. 전압이 주기적으로 영점을 지나는 교류 시스템에서 아크는 전류가 영점에 도달함에 따라 지속성을 가지기 힘들고 자연 소호될 가능성이 크지만, 전류가 주기적으로 영점으로 도달하지 않고 일정 방향으로 흐름이 유지되는 직류 시스템에서의 아크는 자연 소호되지 않고 지속하기 쉬우므로 더욱 위협적이다.

### **2.1.1 아크사고의 종류 및 특징**

아크사고는 사고의 형태에 따라 직렬 아크와 병렬 아크로 분류되며 직류 마이크로그리드에서 아크사고는 그림 2.1과 같이 개념적으로 표시할 수 있다. 직류 마이크로그리드는 상용교류계통에서 정류기를 통해 형성된 직류 계통에 분산전원, 저장장치, 부하와 같은 시스템 구성요소가 연결되는 구조로 일반화할 수 있다. 아크사고는 그림에 나타난 것처럼 구성요소와 직류 링크 간의 전로에서 발생한다.

#### **2.1.1.1 직렬 아크**

직렬 아크는 전류가 흐르는 부하와 직렬인 전로의 전기적 접속에

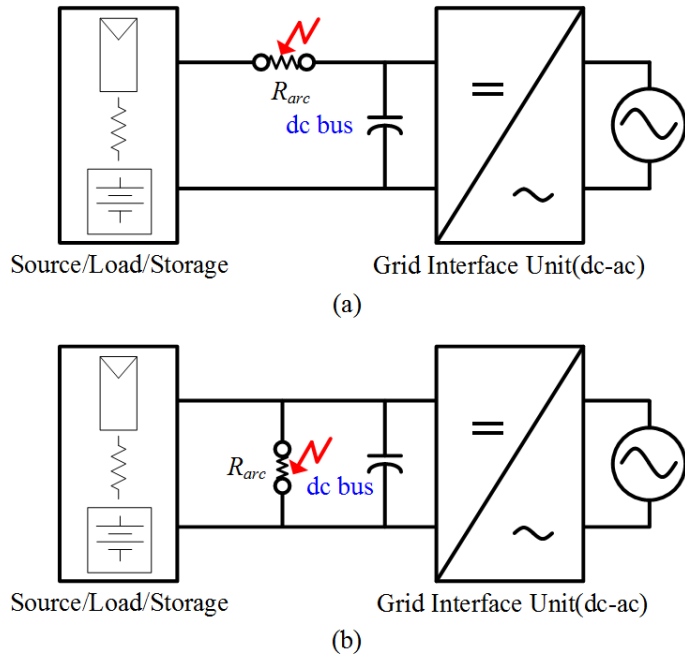


그림 2.1 아크사고의 종류: (a) 직렬 아크, (b) 병렬 아크.

문제가 생겼을 때 발생한다. 직류 아크는 그림 2.1(a)에 나타난 것처럼 직류 배선 링크와 구성요소 사이에 임의의 아크 임피던스  $R_{arc}$  가 삽입되는 형태로 발생하기 때문에 부하전류에 큰 변화를 일으키지 않아 검출이 어려운 것이 특징이다. 이때 사고전류는 직렬 아크사고 발생 시점에 연결된 부하의 특성에 따라 달라진다 [40].

그림 2.2는 일반적인 회로 차단기의 전류-시간 특성 곡선과 아크사고가 발생했을 경우 차단기의 동작영역을 나타낸 것이다 [21]. 그림 2.2와 같이 과전류 차단기는 차단기에 흐르는 통전전류와 시간에 따른 차단 특성을 보이는데, 직렬 아크사고의 경우 차단기의 정상동작 영역에서 크게 벗어나지 않기 때문에 동작영역#2에서 동작하게 되고 따라서 일반 차단기로는 검출이 어렵다. 직류 마이크로그리드는 수많은

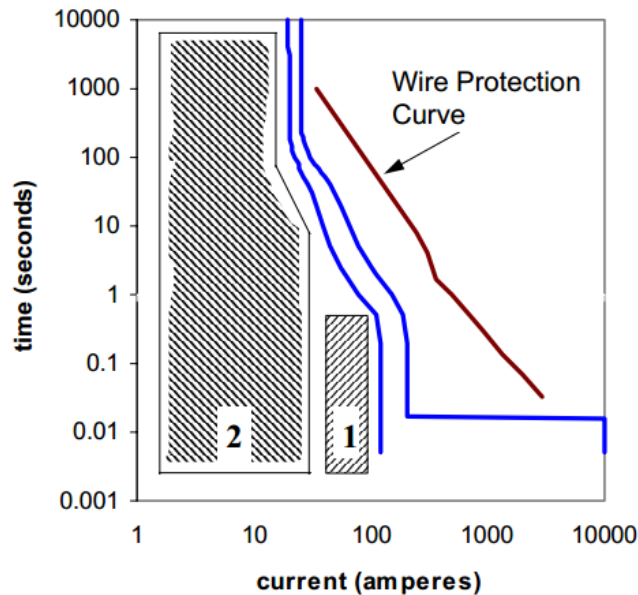


그림 2.2 차단기의 전류-시간 특성곡선과 아크사고 시 동작영역 [21].

커넥터, 납땜, 볼트 등을 통해 구성요소 간 연결이 이루어지기 때문에 직렬 아크사고의 발생 가능성이 병렬 아크보다 월등히 클 뿐만 아니라 검출이 어려워 많은 주의를 필요로 한다 [41, 42].

### 2.1.1.2 병렬 아크

병렬 아크는 그림 2.1(b)에 나타낸 것처럼 서로 다른 전극 간에 절연이 파괴되어 발생한다. 본 논문에서는 접지 아크로도 불리는 충전부와 접지 간 발생하는 아크사고 또한 병렬 아크의 일종으로 분류한다. 병렬 아크사고는 전위가 다른 두 전극 간에 큰 사고전류가 흐른다는 면에서 단락사고와 비슷하지만, 병렬 아크는 사고 저항이 아크의 등가 저항이라는 점에서 사고 저항이 0에 가까운 단락사고와 다르다. 병렬



아크는 부하와 병렬로 일어나기 때문에 일반적으로 큰 사고전류를 발생시키고 따라서 짧은 시간의 사고만으로도 화재를 일으킬 가능성이 크다 [43]. 하지만 차단기의 정격을 넘어서는 큰 병렬 아크사고 전류는 과전류 차단기의 보호기재를 작동시키기 때문에 기존의 보호 장치로도 검출 및 차단할 수 있는 특성을 가진다. 그림 2.2에서 병렬 아크는 동작영역#1에서 동작하여 과전류 차단 동작을 통해 검출될 가능성이 있다 [21].

차단기 전류-동작시간 특성상 과부하나 누전으로 인한 전기화재 및 감전사고는 부분적으로 보호할 수 있지만 아크발생으로 인한 사고는 보호될 수 없다 [44]. 특히 직렬 아크는 병렬 아크와 달리 사고전류가 부하에 의해 제한되어 사고전류가 차단기의 정상동작 범위 안에 머무르기 때문에 검출이 어려워 시스템 보호를 위해 아크사고를 검출하고 차단할 수 있게 하는 별도의 검출기가 필요하다 [45]. 따라서 본 논문에서는 일반 차단기로는 검출이 어려워 상대적으로 관리가 어려운 직렬 아크사고에 집중하여 논의를 진행하도록 한다.

### 2.1.2 아크의 발화 특성 및 아크사고 검출 규정

본 논문에서는 아크의 전기적 특성을 파악하여 신뢰성이 높은 아크사고 검출방법을 도출하고자 한다. 이를 위해 아크의 발화특성을 살펴보고 태양광 시스템용 아크사고 검출기 규격인 UL1699B의 핵심 내용을 살펴봄으로써 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기가 갖춰야 할 검출 요구조건들에 대해서 논의한다.

방치된 아크사고는 화재를 발생시킬 위험이 있으므로 아크가 화재로

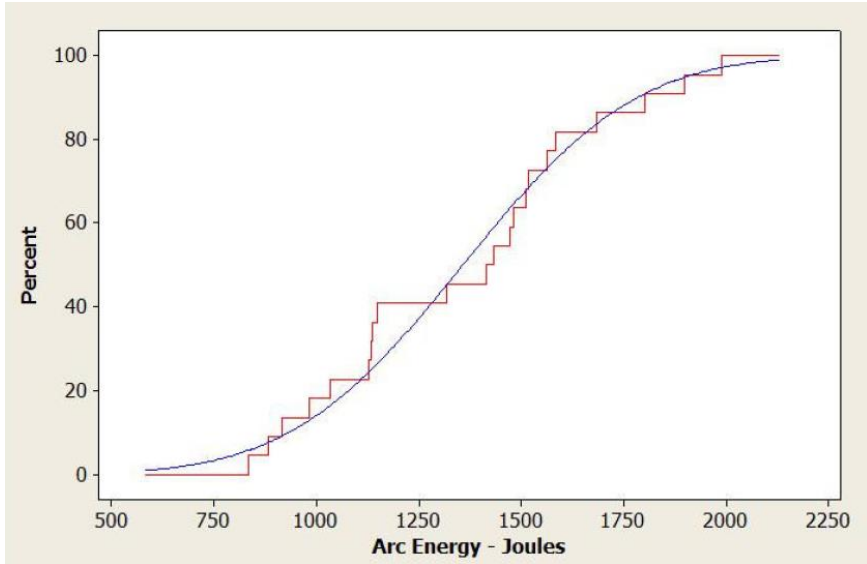


그림 2.3 누적된 아크 에너지에 따른 화재 발생률 [46].

발전되기 이전에 신속하게 검출하여 차단하여야 한다. 낮은 임계치 설정을 통한 아크사고 검출은 사고 검출 확률을 높여 아크사고의 피해를 최소화하지만, 반대로 이에 따라 과도하게 민감해진 사고 검출은 정상상태에서 노이즈에 의한 오작동을 증가시켜 사용자의 불편을 발생시키고 시스템의 이용성을 저하하는 문제를 발생시키기 때문에 아크의 특성을 고려하여 검출기를 설계하여야 한다. 이처럼 아크사고 검출기의 신뢰성은 중요한 성능지표이며 올바른 아크사고 검출기의 구현은 아크사고의 발화 특성에 기반을 두어야 한다 [25, 46, 47].

본 논문에서는 직류시스템에서 아크사고의 규모와 발화 특성의 관계를 확인하기 위해 문헌을 참고하였다. 그림 2.3은 아크사고의 에너지 누적에 따른 화재 발생 확률을 보인다 [46]. 그림에서 빨간 실선은 80 회 실험한 결과에서 도출된 발화 확률을 보이며, 파란 실선은 실험 결과를 함수로

근사화한 결과이다. 그림 2.3과 같이 아크의 에너지가 750 J 이하일 시점에 아크를 차단하면 아크의 화재 발생 확률은 5% 이하가 된다. UL1699B는 이와 같은 화재 발생 데이터를 근거로 (2.1)에 의해 아크사고 차단시간을 요구한다.

$$T_{trip} = \min\left(2, \frac{750}{I_{arc} \cdot V_{arc}}\right) \quad (2.1)$$

(2.1)에서  $T_{trip}$  은 UL1699B에 의해 요구되는 사고 검출시간,  $I_{arc}$  는 아크사고 전류,  $V_{arc}$  는 아크사고 전압이다. 현재는 300 W의 아크를 최소로 하여 2초 이내에 차단하는 것을 규정하고 있으나 100 W 미만의 아크도 화재사고를 일으킬 수 있다는 주장이 계속되면서 규정의 개정이 예상된다 [48, 49].

그림 2.4는 직류 아크사고의 발화 특성을 UL1699B의 검출시간 규정과 함께 나타낸다 [19, 50]. 그림 2.4에서 푸른 실선은 각 조건에서 전극을 둘러싼 실린더(Cylinder) 안쪽의 표면이 발화하기 시작하는 시점을 나타내며, 붉은 실선은 아크가 실린더를 태워 화재가 발생하는 시점을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 아크사고의 발화 및 화재발생 특성은 아크의 전력과 반비례 특성을 보인다. 또한, 붉은 실선으로 표시된 아크사고의 화재 발생 특성과 검은색 실선의 UL1699B 사고 검출 시간 요구치를 비교해 볼 때 요구수치가 아크사고가 화재를 발생시키는 시간보다 모든 영역에서 여유를 가지고 설정되어 있어 직류 아크사고 검출기를 규정하기에 적합함을 확인할 수 있다 [48, 50]. 본 논문에서 논의하는 직류 마이크로그리드 시스템에서의 아크사고에 대한 규정은 현시점에 존재하지 않지만, 직류 환경에서 아크사고의 발화 특성은 동일하게 적용될 것이므로 직류 80 V 이상의 전압을 적용하는 태양광

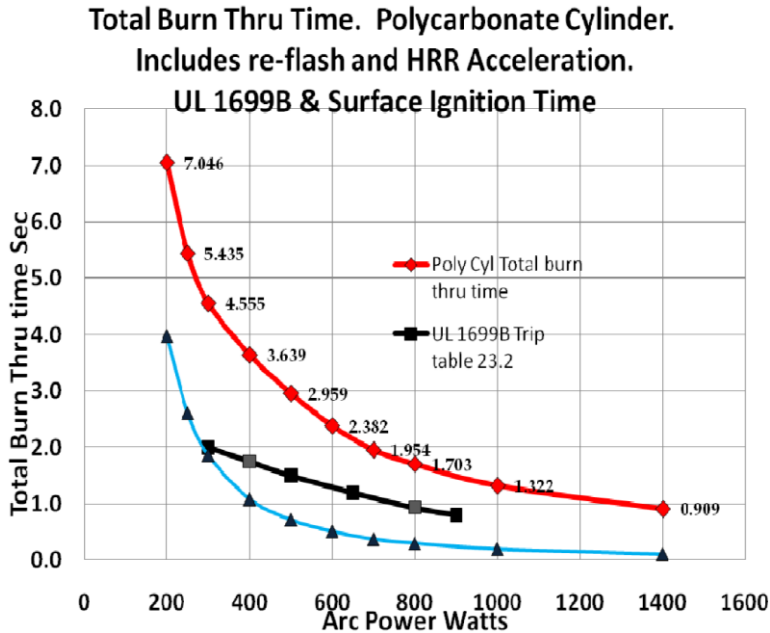


그림 2.4 직류 아크사고의 발화 및 화재 특성과 UL1699B [50].

시스템과 유사한 규정이 요구될 것으로 판단된다. 따라서 UL1699B에 제시된 아크사고 검출기의 시험 절차를 좀 더 자세히 살펴본다.

직류 태양광 시스템용 아크사고 검출기의 성능 시험 절차를 포함하는 UL1699B는 검출기의 성능 평가에서 모의 아크 발생기를 통해 임의의 아크를 생성하도록 한다. UL1699B에 규정된 아크 발생기는 그림 2.5와 같이 고정축(Stationary electrode)과 이동축(Moving electrode)으로 이루어져 각 축에 연결된 전극간의 거리를 조절할 수 있으며, 양극의 사이에 철솜(Steel wool)을 넣어 아크를 발생시킨다. 또한, UL1699B는 그림 2.6과 같이 아크 발생기 양단에 전압을 측정하여 아크사고의 규모에 따른 검출기 동작 시험에 전극간격 등의 시험조건을 조절하여 임의의 전력을 가지는 아크사고 발생 환경을 만들도록 한다 [19]. UL1699B에서

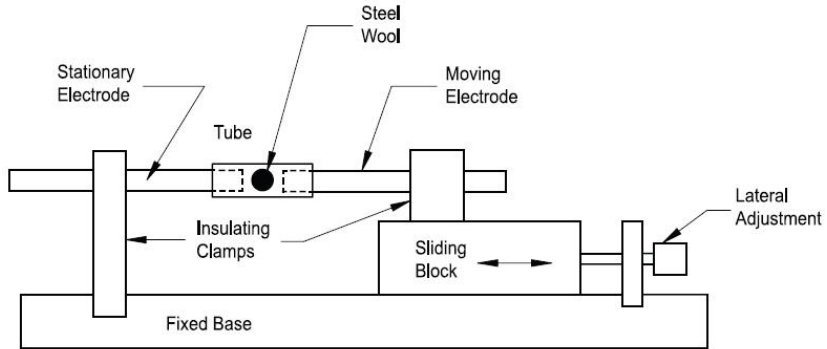


그림 2.5 UL1699B에 의거한 아크 발생기 [19].

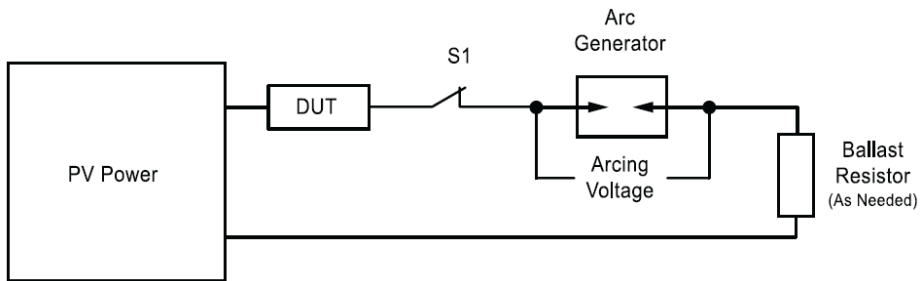


그림 2.6 UL1699B에 의거한 직렬 아크 실험 [19].

표 2.1 UL1699B의 아크 전류, 전압 및 전력에 따른 사고검출시간.

아크 전류[A]	아크 전압[V]	아크전력[W]	검출시간[s]
7	43	300	2
7	71	500	1.5
14	46	650	1.2
14	64	900	0.8

규정하는 아크사고의 규모에 따른 검출시간 요구 수치 등의 시험조건은 표 2.1에 정리하였다.

표 2.1에 따르면 아크사고 검출기는 아크사고의 규모에 따라 화재가

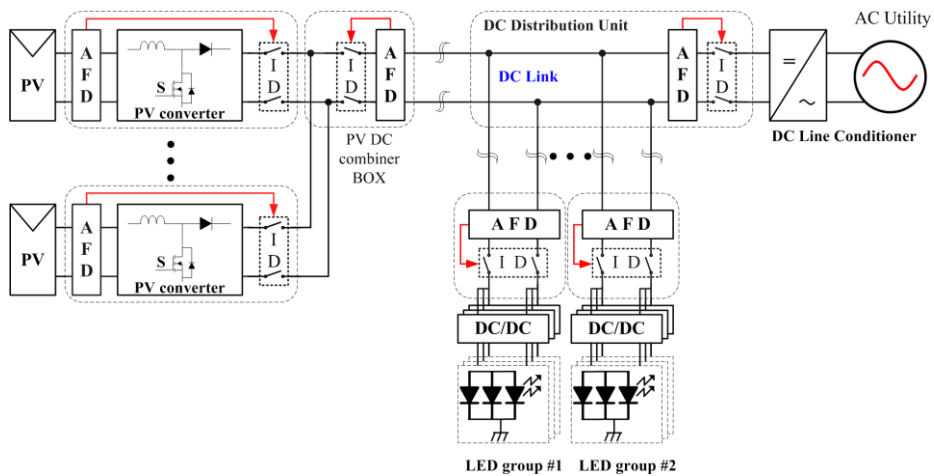


그림 2.7 분기별 아크 검출기를 이용한 직류 시스템 보호.

발생하지 않도록 정해진 시간 내에 아크사고를 검출해야 한다. 만약 아크사고 검출기가 아크사고가 발생하는 정확한 위치를 안다면 UL1699B에서 지시하는 그림 2.6의 아크사고 검출기 시험장치와 같이 아크사고가 일어날 가능성이 큰 위치의 전압과 전류 정보를 직접 획득하여 아크사고를 검출할 수 있을 것이다. 하지만 아크사고는 전류가 흐르는 모든 곳에서 발생할 수 있으므로 직류 마이크로그리드에서 사고 발생 가능성이 있는 모든 위치에 검출기는 설치하는 것은 불가능할 뿐만 아니라 비용 효율적이지 않다. 따라서 그림 2.7과 같이 아크사고 검출기를 분기마다 설치하여 분기 이하의 사고를 검출하고 분기 차단기를 통해 시스템을 보호하도록 하는 것이 현실적이다 [20]. 분기에 설치된 독립된 아크사고 검출기는 사고 검출을 위하여 관측 지점에서 얻을 수 있는 정보인 전압 및 전류를 통해 아크사고를 검출해야 한다. 하지만 직렬 아크의 경우 아크의 전류는 알 수 있지만 아크의 전압을 알 수 없어 아크사고의 규모를 직접 예측하기 어렵다. 표 2.1은 아크사고 검출기가

가지는 제한된 정보로부터 아크사고 검출 시간 결정의 어려움을 명확히 보인다. 표에 나타난 것처럼 아크사고의 규모는 같은 전류에서도 전극간격에 따라 아크 전압이 크게 다르게 나타나고, 결과적으로 같은 전류에서 아크사고 규모에 큰 차이를 보인다 [19]. 임의의 위치에서 발생하는 직류 마이크로그리드 아크사고의 특성상 검출기가 아크 전압을 알 수 없어 제한된 정보만으로 아크사고의 규모를 가늠하기 힘든 조건에서, 높은 신뢰성을 가지는 아크사고 검출 방법의 도출을 위해 본 논문에서는 사고 조건에 따른 아크사고의 특징에 대해서 알아보고자 한다.

## 2.2 아크사고의 전기적인 특성

2.2에서는 먼저 아크의 일반적인 특징을 살펴본 후, 직류 마이크로그리드 환경에서 아크의 전기적 특성을 파악하기 위하여 UL1699B에 의거한 아크 발생기를 통해 모의 아크 실험을 수행한다. 모의실험을 통한 아크의 전기적 특성 분석은 아크가 발생하는 일정 시간 동안 변수들의 평균값 간 관계에 초점을 맞추는 DC 특성 분석과, 아크 전류의 전력 스펙트럼 밀도에서 나타나는 특성 변화에 초점을 맞추는 AC 특성 분석으로 나누어 진행한다. 모의실험 결과를 통하여 아크의 전기적 특성이 논문의 핵심 논의 대상인 직류 마이크로그리드 환경에서 높은 신뢰성을 가지는 아크사고 검출 방법 도출과 연계되도록 통계적 방법을 통해 각 변수 간의 관계에 대해 논의한다.

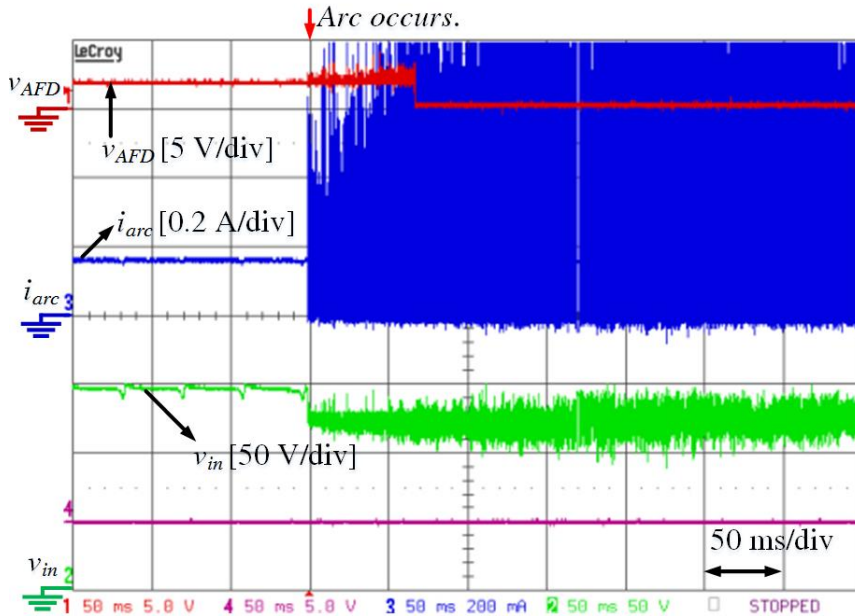


그림 2.8 직류 직렬 아크사고(DC Series Arc Fault) 예.

### 2.2.1 아크의 일반적인 특성

아크의 전기 신호는 그림 2.8과 같이 강한 노이즈를 동반하기 때문에 예측이 거의 불가능하다 [51]. 따라서 많은 연구가 아크의 특성을 이해하기 위해 일정 시간 동안 나타나는 아크의 순시값의 평균을 취하여 대신호적 관점에서 아크의 특성을 분석함으로써 아크 현상을 설명하려고 시도한다 [52, 53]. 아크사고가 발생하는 동안 나타나는 아크의 전압, 전류, 저항의 평균값은 아크의 에너지 누적과 직접적인 관계가 있어 아크의 발화에 결정적인 역할을 하므로 아크의 DC 특성 분석은 유용하다.

아크는 그림 2.9와 같이 Stabilizing wall에 의해 일정하게 연소하여 아크의 모양이 선대칭을 보이는 선대칭형(Axisymmetric) 아크와 공기



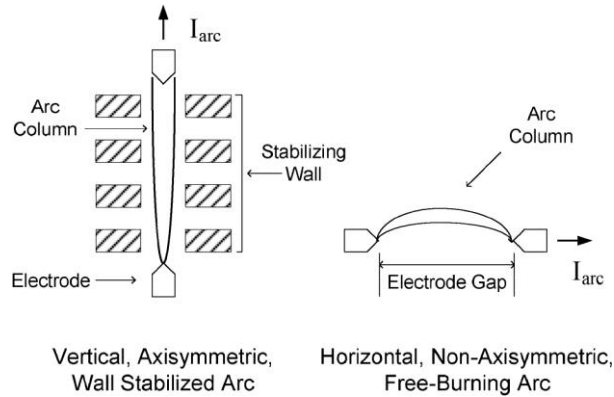


그림 2.9 대칭 특성에 의한 아크의 분류 [54].

중에서 주변의 제한 없이 형성되는 비선대칭(Non-axisymmetric) 아크로 분류된다 [54]. 본 논문에서 논의하는 직류 마이크로그리드의 아크사고는 Stabilizing Wall이 존재하지 않는 임의의 전로에서 발생하는 아크이므로 비선대칭 아크가 발생할 확률이 높다.

전로의 결합에 의해 직렬 전로 상에서 발생하는 아크는 그림 2.10과 같이 양극 영역(Anode region), 플라즈마 영역(Plasma region), 음극 영역(Cathode region)으로 구성된다 [55]. 양극 영역과 음극 영역 두 개의 전극 영역은 플라즈마 가스로 이루어진 아크와 전극 사이의 변화 영역을 구성한다. 각 영역은 다른 전압 경사도(Gradient)를 보이는데 아크 플라즈마 영역의 전압은 아크의 전극간격 및 통전하는 전류에 영향을 받는다 [52, 56].

그림 2.11은 전극간격이 일정하게 고정된 상태에서 아크의 전압-전류 특성을 보인다. 그림에서 볼 수 있듯 아크의 전압-전류 특성은 사고전류의 크기에 따라 저전류 영역(Low current “inverse” region)과 고전류 정전압 영역(High current “constant voltage”

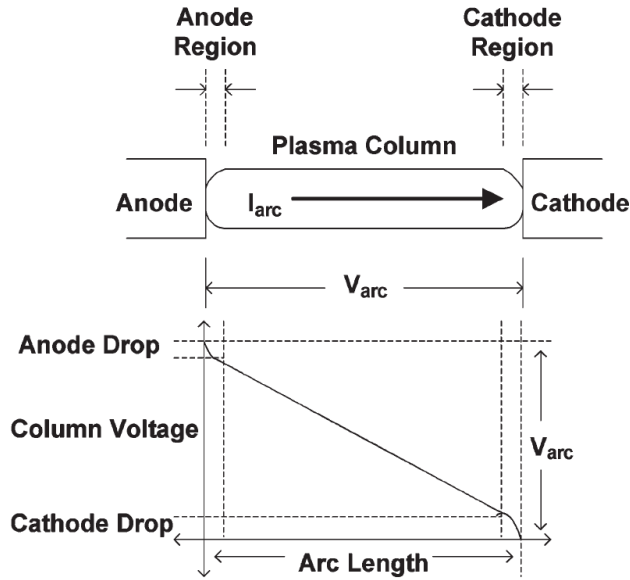


그림 2.10 아크의 구성 및 아크 전압 분포 [55].

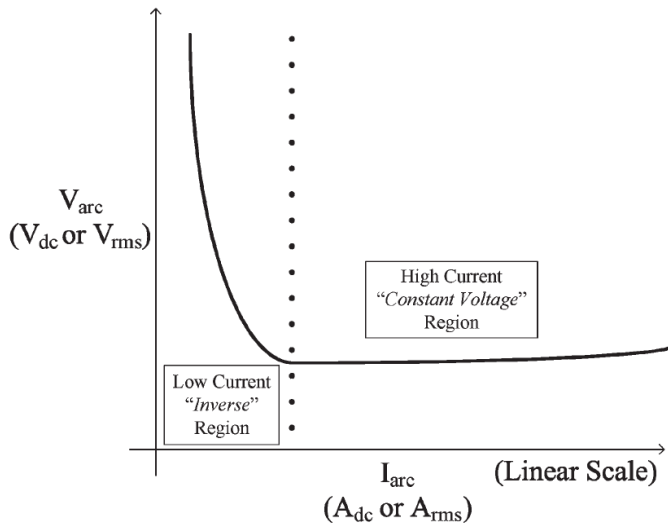


그림 2.11 고정된 극간 거리에서 아크 전압 및 전류 특성 [55].

region)으로 나뉘어 나타난다 [55]. 저전류 영역에서 아크 전압은 전류 증가에 따라 안정되면서 급격하게 낮아지는 특성을 보인다. 반대로 고전류 정전압 영역에서 아크전압은 전류 증가에 따라 아주 낮은 양의

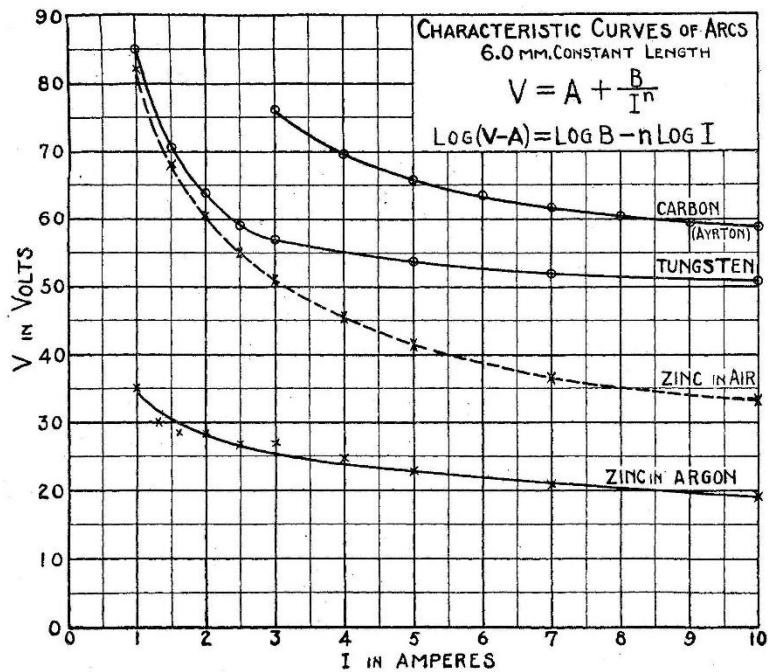


그림 2.12 아크 발생 전극의 물질변화에 따른 전압-전류 특성 변화 [57].

기울기(Positive slope)를 가지고 거의 일정하게 유지된다. 저전류 구간의 부성저항(Negative resistance) 특성 영역은 아크 전류가 증가함에 따라 전압이 감소하여 아크 전력이 전류의 증가만큼 증가하지 않고 소폭만 증가하기 때문에 안정 영역으로 불린다. 반면, 고전류 영역의 아크는 전류 증가에도 전압이 거의 일정하게 유지됨에 따라 전류가 증가한 만큼 아크 전력이 증가하므로 불안정한 영역으로 불린다 [55].

그림 2.12는 아크가 발생하는 전극의 물질 및 전극 간의 기체 종류에 따라 달라지는 아크의 전압-전류 특성을 보인다 [57]. 참고문헌의 실험에서 전극간격은 6 mm로 유지되었으며 (2.2)와 같이 아크의 전압-전류 특성을 설명한다 [57].

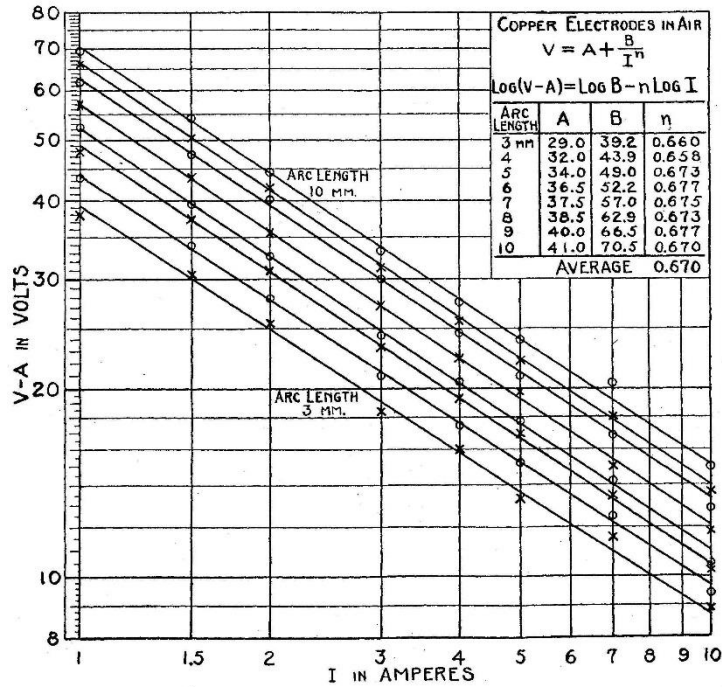


그림 2.13 구리 전극 아크의 극간 거리에 따른 전압-전류 특성 [57].

$$V_{arc} = A + \frac{B}{I_{arc}^n} \quad (2.2)$$

(2.2)에서  $V_{arc}$  는 아크의 전압,  $I_{arc}$  는 아크의 전류,  $A$ ,  $B$  는 상수이다. 지수  $n$  은 절대온도로 표현되는 전극의 끓는점  $T$  에 (2.3)과 같이 선형 비례한다.

$$n = 2.62 \cdot 10^{-4} \cdot T \quad (2.3)$$

끓는점이 2835K인 구리의 경우  $n$ 은 약 0.68이며, 탄소의 경우 3800K으로  $n$ 은 약 1이다.

그림 2.13은 구리전극을 사용한 아크실험에서 전극간격을 3 mm에서

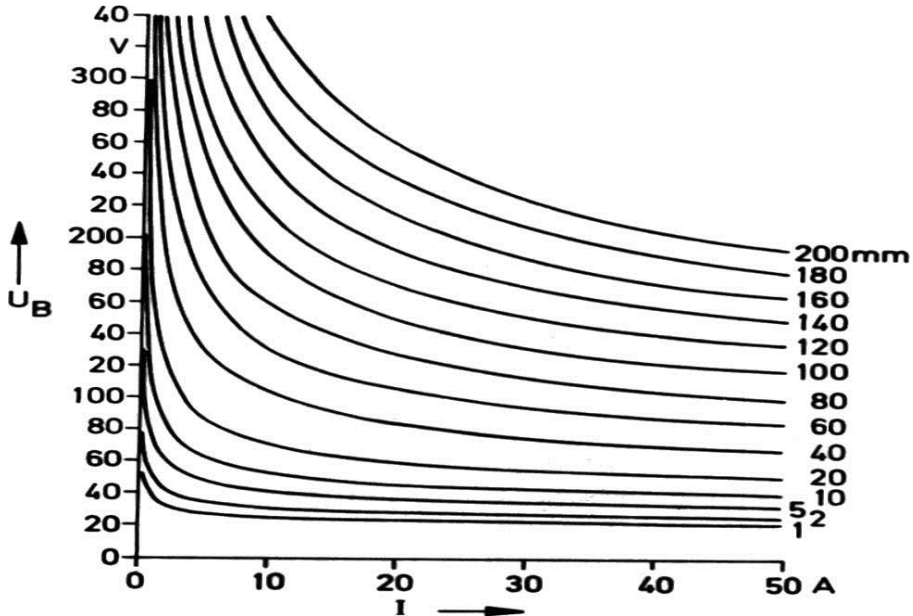


그림 2.14 전극간격에 따른 직류 아크의 전압-전류 관계 [55].

10 mm로 변화시킴에 따라 나타나는 아크의 전압-전류 특성이다 [57]. 그림에서 전극간격이 증가함에 따라 아크 양단에 걸리는 전압은 증가하며, 이에 따라 상수  $A$ 와  $B$ 도 변화한다. 지수  $n$ 은 앞서 언급한 것처럼 같은 전극 물질 조건이라면 거의 변화가 없다 [58].

아크의 전압-전류 특성은 전극의 물성 및 전극간격에 영향을 받는다. 직류 마이크로그리드에서 모든 전선 및 커넥터에 구리를 사용한다고 가정하면 전극간격이 유일한 아크 전압-전류의 변수가 된다. 따라서 그림 2.14와 같은 아크 전압-전류 관계를 예측할 수 있다 [55]. 직류 마이크로그리드 환경에서 직렬 아크는 아주 낮은 임피던스로 긴밀하게 연결된 정상적인 전로에 노화나 상처로 인한 문제나 커넥터를 이용한 긴밀한 접속이 서서히 풀리면서 일어나는 아크가 대부분일 것이다 [59].

따라서 마이크로그리드 시스템의 아크사고에서 예상되는 현실적인 전극간격은 수 mm로 고려하고 본 논문의 논의를 계속한다 [60, 61].

지금까지 직류에서 아크가 발생할 때 전로의 전기신호에 나타나는 DC 특성을 살펴보았다. 대부분의 선행연구는 실험을 통해 나타난 아크의 전압-전류 특성을 반영할 수 있는 모델을 곡선접합(Curve fitting)과 같은 방법으로 근사하고 주어진 조건에 맞는 상수를 제공한다. 본 논문에서는 직류 마이크로그리드에 적합한 아크 모델을 찾기 위해서 아크 발생기를 제작하고 통제된 조건에서 실험을 시행하여 아크의 전압-전류 특성을 파악한다.

본 연구에서는 직류 마이크로그리드 환경에서의 아크사고를 논의하기 때문에 직류 태양광 시스템에 적용되는 아크사고 검출기의 검사 규격인 UL1699B를 따르는 아크 발생기(Arc Fault Generator, AFG)를 제작하여 실험하였다. UL1699B의 규격에 따라 모의 아크사고를 발생시키기 위해서 그림 2.15와 같은 아크 발생기를 제작하였으며, 그림 2.16과 같이 아크 발생기를 고정축과 수평으로 움직임이 가능한 이동축으로 구성함으로써, 임의의 전극간격을 설정하여 실험하는 것이 가능하다.

제작된 아크 발생기를 이용하여 그림 2.17과 같은 실험 세트를 구성하여 다양한 조건에서의 아크 발생 시 나타나는 아크의 전기적 특성을 확인 한다. 실험 세트는 직류 전압을 인가하는 직류 전원, 아크 발생기, 저항 부하로 이루어 지며 모의 아크사고 발생에 따른 전로의 전압, 전류의 변화를 관찰하기 위해 파형 측정기(Oscilloscope)와 연동되는 전압센서(Voltage probe)와 전류센서(Current probe)를 사용하였다. 실험에서 직류 전원은 Netpower Labs 社의 RE 2500-

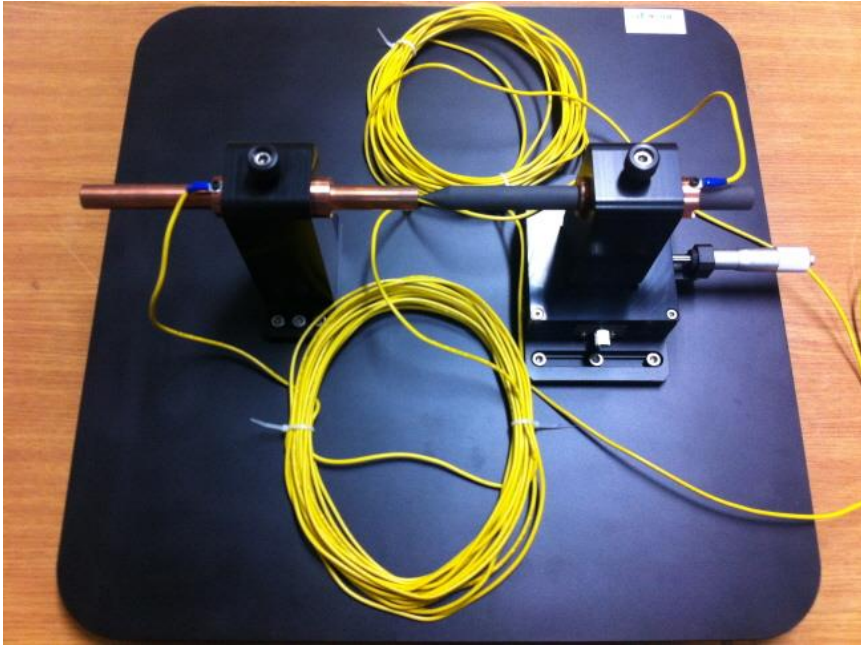


그림 2.15 모의 아크 실험용 아크 발생기.

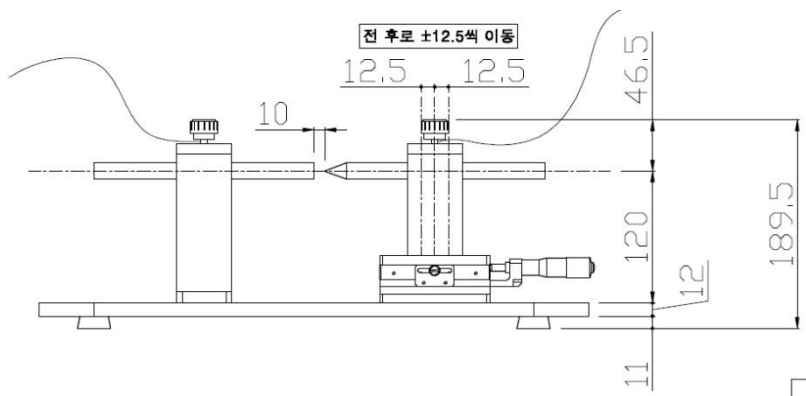


그림 2.16 제작된 아크 발생기의 제원.

380을 이용하였으며, 파형측정기는 LeCroy 社の WaveRunner 64Xi(600 MHz, 4 채널, 5 GS/s)를 사용하였다. 전압센서는 ADP300(1000  $V_{rms}$ , 20 MHz), 전류센서는 DC 성분과 AC 성분을 함께

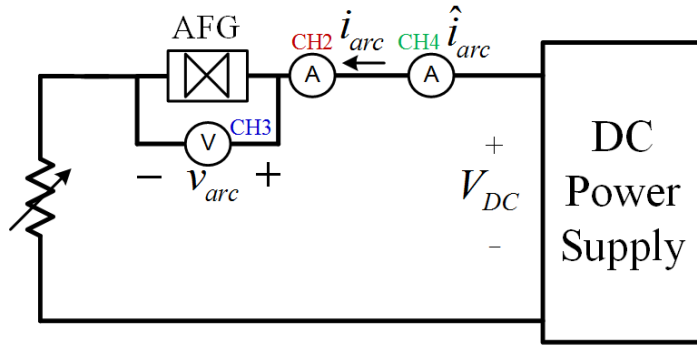


그림 2.17 아크의 전기특성 변화 관찰을 위한 실험 세트.

표 2.2 아크 특성 파악을 위한 실험 조건.

전극 소재	구리
DC 전압 [V]	380
부하 전류 [A]	1.25, 2.5, 3.75, 5
전극간격 [mm]	0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4
온도 [°C]	27.5
습도 [%]	57

관찰하기 위하여 각각 CP150(150 A, 10 MHz)과 CP015(15 A, 50 MHz)를 사용하였다. 본 논문에서는 직류 마이크로그리드 환경에서 사용 가능성이 큰 380 V 환경에서 전류 및 전극간격의 변화에 따라 나타나는 아크사고의 전기적 특성에 초점을 맞춘다. 실험 조건은 표 2.2와 같이 총 20회의 실험을 수행하고 파형 측정기의 파형 저장 기능을 이용하여 아크의 양단에 걸리는 전압  $v_{arc}$ , 아크가 생성된 전로에 흐르는 전류  $i_{arc}$ ,  $i_{arc}$ 의 AC 성분  $\hat{i}_{arc}$ 를 취득한다. 파형 측정기로 취득한 전압, 전류 데이터는 1 MS/s 샘플링(Sampling)으로 10초간 취득하였다.

2장에서는 20회의 실험 데이터로부터 아크사고가 발생한 전로에



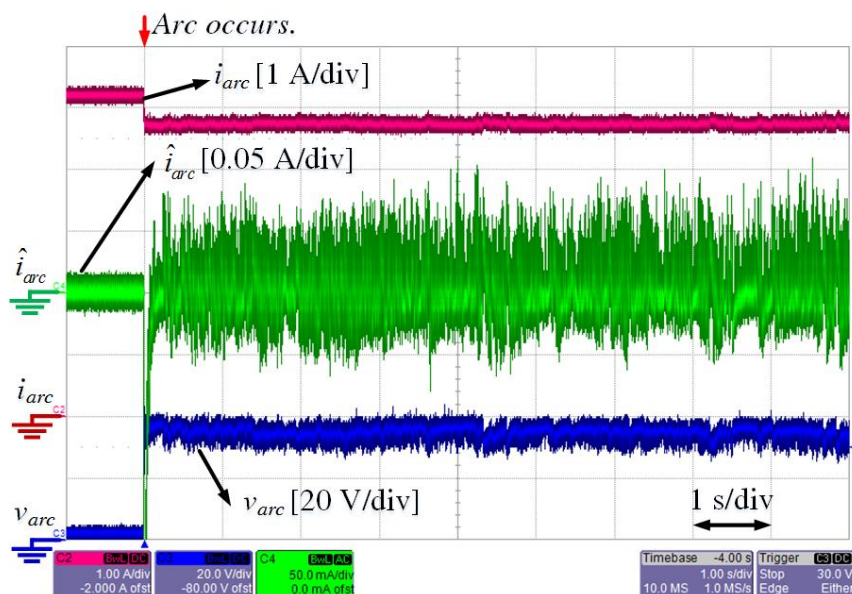


그림 2.18 아크 발생 실험 파형(아크 전류: 5 A, 전극간격: 1.6 mm).

나타나는 전압, 전류 데이터를 취득하여 아크의 DC 특성과 AC 특성을 분석한다. 아크의 DC 특성 분석은 아크 발생 시간 동안 얻어진 전압  $v_{arc}$ , 전류  $i_{arc}$  데이터의 평균값을 취하여 전극간격과 전류의 변화에 따른 아크의 전압, 전류, 전력, 등가 저항, 전극간격 등의 변수 간 관계를 도출할 것이다. 그림 2.18은 실험 조건 중 하나인 전류 5 A, 전극간격 1.6 mm 조건에서 획득한 파형을 보인다. 모든 조건에서의 파형 데이터는 부록에 첨부하였다. 실험으로부터 도출된 데이터 및 변수 간 관계를 통해 아크의 전기적 특성을 분석 및 모델링(Modeling)하며, 이러한 특성을 아크사고 검출에 활용할 방안에 대해 논의한다. AC 특성 분석은 아크 전류의 AC 성분인  $\hat{i}_{arc}$ 의 전력 스펙트럼 밀도에 대한 분석을 통해 이루어지며, 아크 발생에 따라 나타나는 주파수 스펙트럼의 변화를

아크사고 검출에 이용할 수 있는지를 집중적으로 논의한다.

## 2.2.2 아크의 DC 특성

2.2.2는 20개 조건의 실험 결과로부터 DC 성분에 해당하는 전압, 전류의 평균치로 전류, 전극간격 변화에 따른 아크의 DC 특성을 분석한다. 앞서 논의한 것처럼 UL1699B는 아크사고 발생 후 2초 이내에 사고를 검출하도록 하므로, 본 분석은 아크 발생 초기 2초 동안 얻어진 데이터를 대상으로 한다.

먼저 실험조건에 따른 아크 등가 저항의 변화를 살펴본다. 그림 2.19는 전극간격 및 전류 변화에 따른 아크 등가 저항의 변화를 나타낸다. 그림과 같이 아크 등가 저항  $R_{arc}$  는 전극간격  $d$  가 증가함에 따라 함께 증가한다. 아크 전류가 공기 중으로 흐르는 거리가 늘어남에 따라 저항이 증가한다는 것은 직관적이다. 또한 그림 2.19는 아크 전류의 변화 따른 아크 등가 저항의 변화를 보여준다. 실험 결과를 통해 아크 등가 저항은 낮은 전류 범위에서 전극간격에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 그림 2.19를 통해 아크 전류 및 전극간격이 아크의 등가 저항에 미치는 영향을 알 수 있지만 임의의 위치에서 발생하는 아크사고의 전극간격은 아크사고 검출기가 직접 측정하기 어려워 아크사고 검출 및 사고 규모를 직접 예측하는 데 이용하기 어렵다.

다음으로 전극간격의 변화에 따른 아크사고의 전압-전류 관계를 살펴본다. 그림 2.20은 전극간격을 0.8 mm에서 4.0 mm로 단계적으로 변화시켰을 때 아크 전압과 전류의 관계이다. 실험에서 아크 전류가 증가함에 따라 아크 전압은 감소하며, 아크의 전극간격이 증가함에 따라

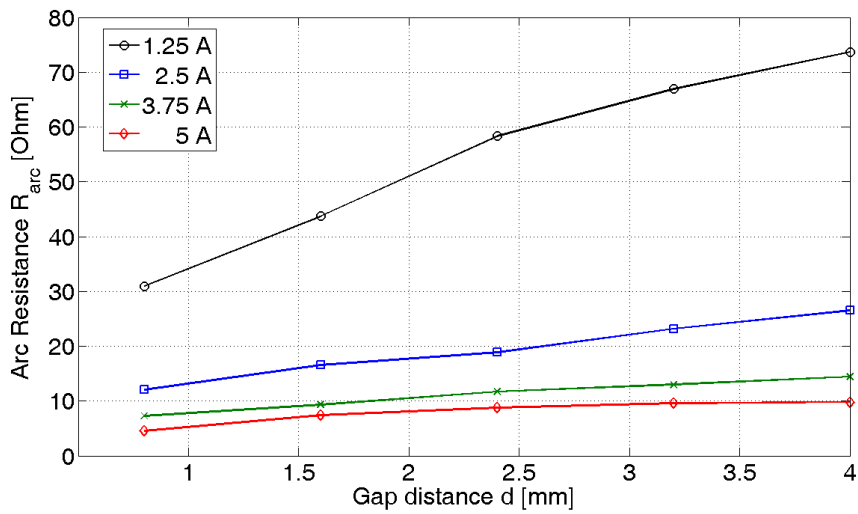


그림 2.19 전극간격 및 전류 변화에 따른 아크의 등가저항의 변화.

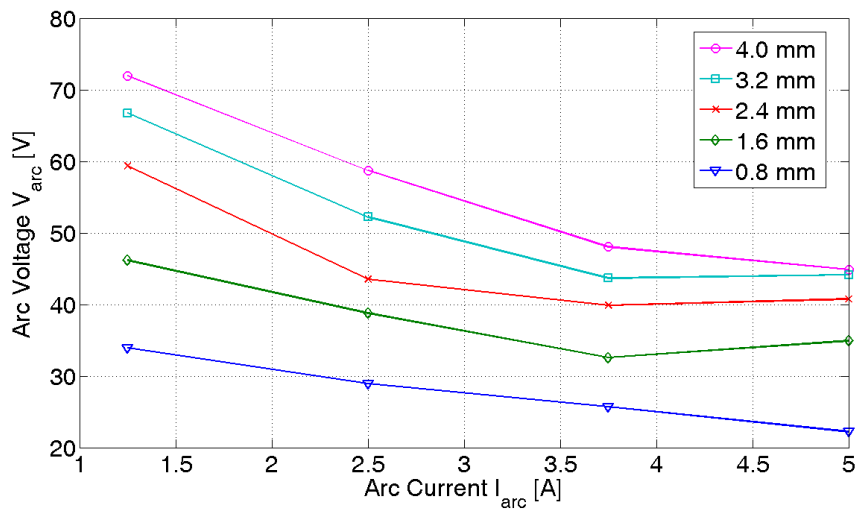


그림 2.20 전극간격 변화에 따른 아크 전압-전류 관계.

아크 양단에 걸리는 전압이 증가한다. 실험에서 보인 결과는 앞서 논의한 그림 2.14에 나타난 전압-전류의 관계와 같은 경향을 보인다. 이러한

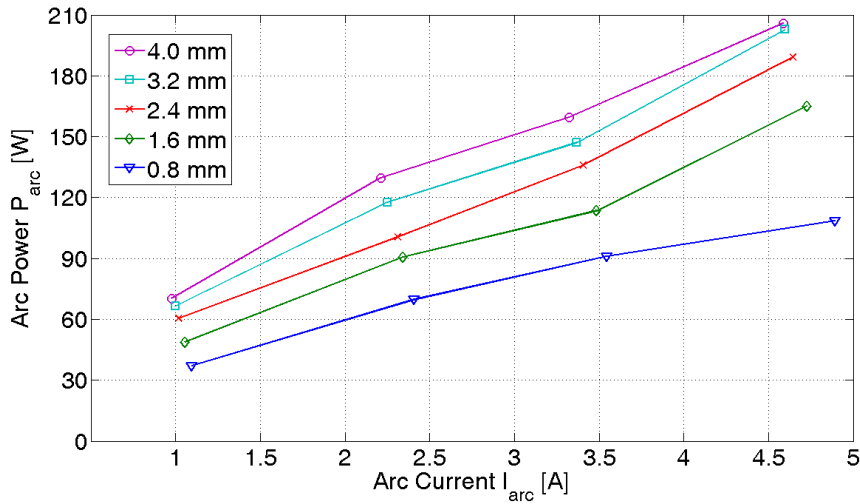


그림 2.21 전류 및 전극간격 변화에 따른 아크소모 전력 변화.

현상은 아크 전류가 증가함에 따라 아크가 안정화 되어 아크의 플라스마 영역의 전기적 저항이 감소하고, 아크 저항 감소에 따라 아크 양단의 전압이 감소하는 것으로 풀이된다.

그림 2.21은 전극간격 및 전류 변화와 아크 전력  $P_{arc}$ 의 관계를 보인다. 실험은 표 2.2와 같이 4가지의 전류 조건에서 시행하였으나 전극간격의 변화에 따라 그림과 같이 사고에 따른 아크 전류의 강하 정도가 다르게 나타난다. 그림 2.21에 보인 것처럼 같은 전극간격 조건에서 아크가 소모하는 전력은 아크 전류가 증가할수록 함께 증가하며, 이러한 현상은 전류가 증가함에 따라 아크의 등가 저항이 감소하지만, 등가 저항의 감소는 전류 제곱의 증가에 비해 작기 때문이다. 또한, 전류가 일정한 조건에서 아크의 전극간격 증가에 따라 아크 전력도 함께 증가하는 이유는 그림 2.20과 같이 전극간격 증가 조건에서 아크 전류 강하는

상대적으로 작은 반면에 전압은 크게 상승하기 때문이다.

### 2.2.3 아크의 DC 특성 모델

2.2.3은 직류 마이크로그리드 환경 임의의 조건에서 아크의 전기적 특성을 예측할 수 있도록 앞서 살펴본 직류 아크의 DC 특성을 고려하여 아크의 전압, 전류, 전극간격 간의 관계를 모델링한다. 많은 선행연구는 다양한 조건에서 DC 특성 분석을 통해 직류 아크 현상을 이해하고 모델링을 통해 도출된 수식으로 변수 간의 관계를 설명한다 [58, 62–66]. 대부분의 선행연구는 모의 아크 실험을 통해 얻은 데이터의 경향을 살펴보고 곡선 적합을 이용해 각 파라미터의 관계를 일정 수식으로 나타내는 방법으로 아크의 전기적 특성을 표현한다. 본 연구에서는 모의 아크 실험을 통해 얻은 직류 아크 데이터에 대표적인 선행연구의 여러 모델링 기법을 적용하여 각 모델의 적합도를 판단하고, 직류 마이크로그리드의 아크사고를 설명할 수 있는 수식 및 모델 상수를 도출하여 아크를 모델링한다.

1902년에 제안된 Ayrton의 아크 수식은 아크 현상을 수식으로 표현한 시초이다 [62]. Ayrton의 아크 수식은 수 mm의 전극간격을 가지는 탄소 전극 간에 일어나는 아크의 DC 특성을 표현한다. Ayrton의 수식은 (2.4)와 같이 표현되며  $A, B, C, D$ 는 실험조건에 따라 달라지는 상수이다.

$$V_{arc} = A + B \cdot L + \frac{C + D \cdot d}{I_{arc}} \quad (2.4)$$

$A$ 는 아크의 양극 영역 및 음극영역에서 나타나는 전압강하 정도를 표현한다.  $B$ 는 플라스마 영역에서 나타나는 전압 강하를 나타낸다.  $C$ 와

표 2.3 Steinmetz 아크 수식의 상수.

전극 소재	$A$	$B$	$C$
탄소	36	130	0.33
자철석	30	123	0.05

$D$ 는 아크의 비선형 특성을 나타낸다.

1906년에 Steinmetz가 제안한 탄소와 자철석(Magnetite) 전극에서 나타나는 아크 현상을 설명하기 위한 아크 수식은 (2.5)와 같다 [63].

$$V_{arc} = A + \frac{B(C+d)}{\sqrt{I_{arc}}} \quad (2.5)$$

(2.5)에서 전극간격  $d$ 의 단위는 인치이며, [63]에서 밝힌 탄소와 자철석에서 나타나는 아크 수식의 상수는 표 2.3에 정리하였다. 지수가 있는 Steinmetz의 아크 모델은 Ayrton의 모델에 비해 복잡도가 높다.

2.2.1에서 아크의 전압-전류 특성을 논의하면서 소개한 1920년대에 제안된 Nottingham의 아크 수식은 (2.6)과 같으며,  $n$ 은 1보다 작은 양의 실수로  $n$ 이 0.5인 Steinmetz의 수식과 비슷한 형태를 가지지만 높은 복잡도를 가진다 [58].

$$V_{arc} = A + \frac{B}{I_{arc}^n} \quad (2.6)$$

(2.6)은 전극 물질에 따라서 달라지는 지수  $n$ , 전극간격 및 전극 소재에 따라 달라지는  $A$ ,  $B$ 로 구성된다. Nottingham의 수식은 전극간격에 대한 영향을 포함하지 않아 조건에 따라  $A$ ,  $B$ 가 달라진다.

Paukert는 Nottingham의 수식과 유사하지만 더 간단한 형태인 (2.7)과 같은 모델을 제안하였다 [55, 67].

$$V_{arc} = \frac{A}{I_{arc}^B} \quad (2.7)$$

(2.7)은 Nottingham의 수식에 비해 간단하지만 아크의 전극간격에 따라 상수  $A$ ,  $B$ 가 바뀌는 단점이 있다. Yao는 이러한 단점을 극복하기 위해 Paukert의 수식을 변경하여 아크의 전류와 전극간격에 따른 모델을 (2.8)과 같이 제시하였다 [59].

$$V_{arc} = \frac{A + C \cdot L}{I_{arc}^{(B+D \cdot L)}} \quad (2.8)$$

(2.8)은 참고문헌의 저자가 실험한 환경에서 아크의 전압, 전류, 전극간격 간의 관계를 오차 10% 이내로 설명한다.

본 논문에서는 Ayrton이 제시한 선형모델, Steinmetz가 제안한 지수모델, Yao가 Paukert의 모델을 수정하여 제시한 아크 모델을 본 연구에서 진행한 실험결과에 적용하여 모델의 적합성 및 유용성을 논의한다.

표 2.4는 그림 2.20에 나타난 아크 전류 및 전극간격에 따른 아크 전압 데이터이다. 본 연구에서는 MATLAB의 곡선접합 기능을 이용하여 각 모델에 적합한 상수들을 도출하고 여러 평가 지표를 통해 모델의 적합성을 논의한다.

표 2.5는 실험결과의 전압-전류 특성을 반영하는 각 모델의 곡선접합 상수들을 보인다. 모델의 적합도를 판단하기 위해 실험데이터와 모델로 추정한 데이터를 그림 2.22에 함께 나타내었다. 그림과 같이 각 모델은 각기 다른 수식으로 아크의 특성을 추정하기 때문에 다른 근사 특성을 보인다.

표 2.6은 아크 모델의 정확도를 비교한다. SSE(Sum of Squares due to

표 2.4 아크 전류 및 전극간격에 따른 아크 전압.

	1.25 A	2.5 A	3.75 A	5 A
0.8 mm	33.9320	28.9507	25.7081	22.1937
1.6 mm	46.1624	38.7633	32.5739	34.9294
2.4 mm	59.3920	43.5390	39.8950	40.7410
3.2 mm	66.7218	52.2260	43.6839	44.1179
4.0 mm	71.9556	58.6976	48.0519	44.8954

표 2.5 곡선접합을 이용한 실험결과의 아크 모델의 상수.

	Ayrton	Steinmetz	Yao
<i>A</i>	18.81	17.2	24.93
<i>B</i>	4.994	13.93	0.1773
<i>C</i>	9.713	0.6727	14.22
<i>D</i>	9.011	—	0.04786

표 2.6 아크모델의 정확도 수치비교.

	Ayrton	Steinmetz	Yao
SSE	110.042	111.779	93.787
R-Square	0.966	0.966	0.971
RMSE	2.623	2.564	2.421

Error)는 모델이 추정하는 아크 전압과 실험에서 얻어진 전압의 오차의 제곱합(Square sum)으로 작을수록 모델이 높은 정확도를 가짐을 의미한다. 따라서 SSE에 의해 아크 모델은 Yao, Ayrton, Steinmetz의 순으로 높은 정확도를 보임을 알 수 있다 [68]. R-Square는 SSR(Sum of Squares due to Regression)과 SST(Sum of Squares Total)의 비율로 1에 가까울수록 모델이 높은 정확도를 가짐을 의미한다 [68]. RMSE(Root Mean Square Error)는 실효값의 에러로 0에 가까울수록 높은 정확도를 의미한다 [69]. 결과적으로 3가지의 아크 모델 중 표 2.6과 같이 4개의 상수를 이용하여 지수함수로 아크특성을 모델링한



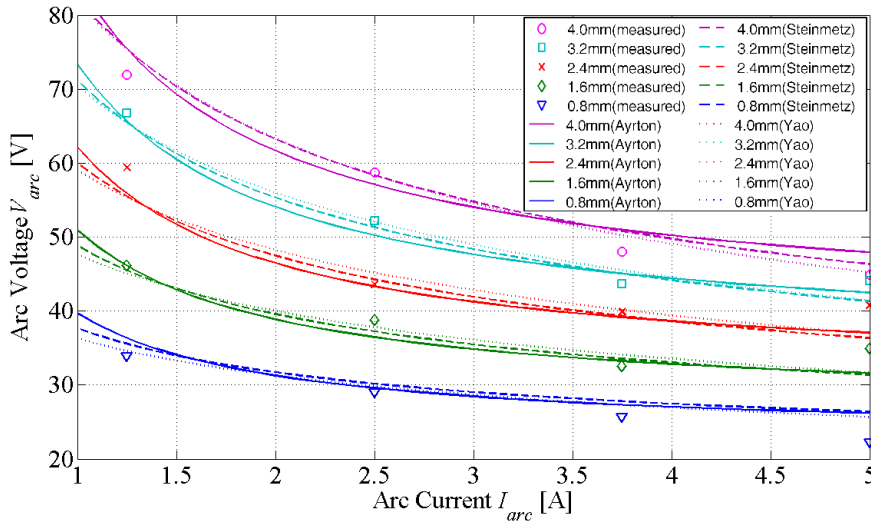


그림 2.22 아크모델의 전압-전류 특성 곡선 비교.

Yao의 수식이 가장 높은 정확도를 보인다. 하지만 Ayrton과 Steinmetz의 아크 모델도 상당한 정확도를 보이므로 선형관계로 표현되어 수식 복잡도가 낮은 Ayrton의 모델도 아크 전압 추정에 적용 가능할 것이다.

2.2.3에서는 아크 모델을 이용하여 전압, 전류, 전극간격의 함수로 아크의 DC 특성을 나타낼 수 있음을 확인하고, 직류 마이크로그리드의 직렬 아크사고 또한 표현 가능함을 보였다. 하지만 마이크로그리드의 분기에 설치되는 독립된 형태의 아크사고 검출기는 아크사고 검출 및 사고 규모 예측을 위해 필요한 아크 전압 또는 전극간격 정보를 직접 취득할 수 없으므로 아크의 DC 특성은 아크사고 검출에 직접 활용하기 어렵다. 2.2.4에서는 검출기가 직접 획득 가능한 분기 전류의 AC 성분을 이용한 아크사고 검출에 대해 논의하기 위해 아크의 AC 특성 분석을

수행한다.

## 2.2.4 아크의 AC 특성

2.2.4는 아크의 AC 특성을 이용한 아크사고 검출 및 사고 규모 예측에 대해 논의한다. 먼저 아크사고 발생 순간 일어나는 전류 강하 특성을 이용한 아크사고 검출 및 아크 전압 예측 가능성에 대해 논의한다. 다음으로 정상 상태 및 아크사고 조건에서 전류의 전력 스펙트럼 밀도 분석을 통한 아크사고의 규모 예측 및 사고 검출의 가능성에 대해 논의한다.

### 2.2.4.1 전류 강하 특성을 이용한 아크사고 검출

아크 발생 순간의 전류 강하 특성을 이용한 아크사고 검출을 논의하기 위해 표 2.2에 제시한 조건의 실험에서 취득한 데이터를 이용한다. 그림 2.23은 데이터 취득방법의 이해를 돕기 위해 전류 3.75 A 전극간격 3.2 mm 조건에서 아크 실험 파형을 보인다. 그림과 같이 아크는 1초에 발생하여 9초 동안 유지되어 1초간의 정상상태 데이터 및 9초간의 아크사고 데이터를 취득한다. 1 MS/s로 취득된 10초간의 데이터에서 아크 발생 직전 16 ms 동안의 데이터와 아크 발생 직후 16 ms 동안의 평균값을 취하여 분석한다. 아크사고가 발생하는 순간 전로에 아크 등가 저항  $R_{arc}$ 가 삽입됨에 따라 전류 강하가 관측된다. 또한, 0에 가깝던 전극 양단 전압  $v_{arc}$ 는 아크가 생성되며 수십 볼트를 형성한다.

그림 2.24는 모의실험에서 나타나는 아크 발생 순간 아크 전압과

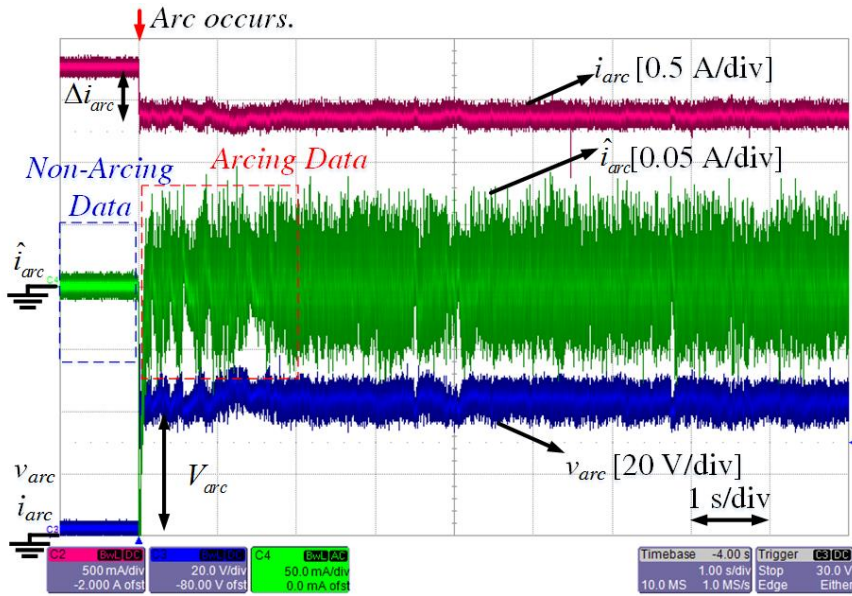


그림 2.23 아크 발생 실험 파형(전류: 3.75 A, 전극간격: 3.2 mm).

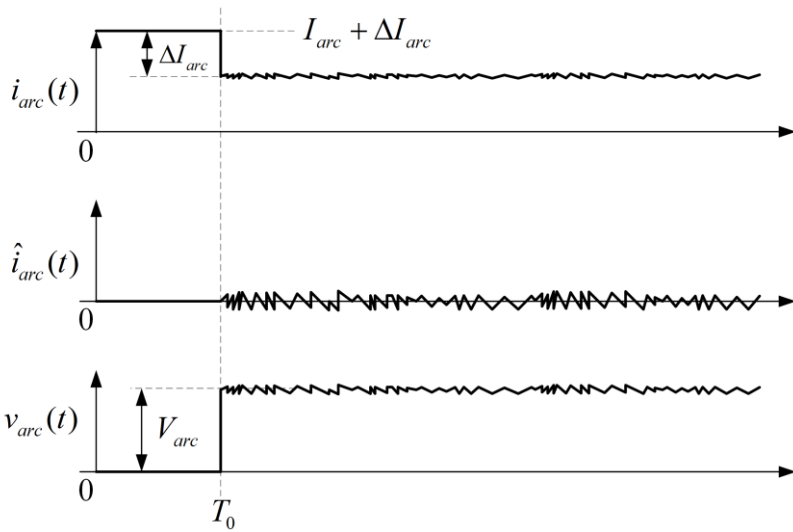


그림 2.24 아크 발생 시 전류 강하 및 아크 전압.

전류의 특성을 단순화하여 나타낸 그림이다. 분석을 위한 아크사고 발생 전과 후의 단순화된 등가회로는 각각 그림 2.25, 그림 2.26과 같이

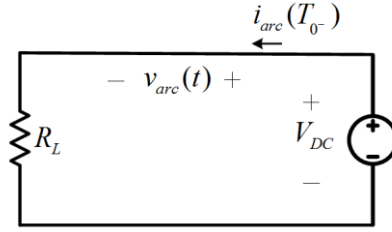


그림 2.25 아크사고 직전의 등가회로.

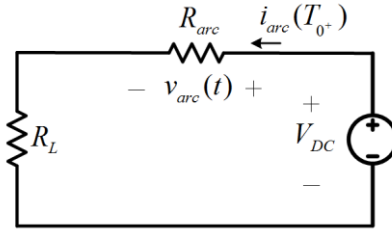


그림 2.26 아크사고 직후의 등가회로.

나타낼 수 있다. 등가회로에서  $i_{arc}(T_{0^-})$  는 사고 직전의 정상전류를,  $i_{arc}(T_{0^+})$  는 아크사고가 발생한 직후의 아크 전류를 말한다. 부하는 저항  $R_L$  로 등가화할 수 있다고 가정한다. 아크의 등가 저항 또한 DC 성분만을 고려하여  $R_{arc}$  로 나타내며 아크 전압에 큰 영향을 미치는 전극간격은 상수로 가정한다. 따라서 아크 전압은 (2.9)와 같다.

$$V_{arc} = i_{arc}(T_{0^+}) \cdot R_{arc} \quad (2.9)$$

또한 아크사고 직전 및 직후의 전류  $i_{arc}$  는 각각

$$i_{arc}(T_{0^-}) = \frac{V_{DC}}{R_L}, \quad (2.10)$$

$$i_{arc}(T_{0^+}) = \frac{V_{DC}}{R_{arc} + R_L} \quad (2.11)$$

이며, 전류의 변화량  $\Delta I_{arc}$  는 (2.12)와 같다.

$$i_{arc}(T_{0^-}) - i_{arc}(T_{0^+}) = \frac{V_{DC}}{R_L} - \frac{V_{DC}}{R_{arc} + R_L} \quad (2.12)$$

수식을 간단하게 하기 위해 (2.12)를 정리하면

$$i_{arc}(T_{0^-}) - i_{arc}(T_{0^+}) = \Delta I_{arc} = \frac{V_{DC} \cdot R_{arc}}{R_L(R_{arc} + R_L)} = \frac{V_{arc}}{R_L} \quad (2.13)$$

와 같고 따라서

$$V_{arc} = R_L \cdot \Delta I_{arc} \quad (2.14)$$

이다. 결과적으로 식 (2.14)로부터 부하 증가 저항  $R_L$  과 전류 변화량  $\Delta I_{arc}$  를 통해 아크 전압을 알 수 있어 아크사고의 규모를 예측할 수 있다는 결론을 얻는다.

그림 2.27은 (2.14)를 통해 예측된 아크 전압과 실험에서 직접 측정된 아크 전압의 비교이다. 아크 전압 예측에서 부하 증가 저항  $R_L$  을 계산하기 위해 필요한 배전전압  $V_{DC}$  는 380으로 변화가 없다고 가정하였으며 전류는 앞서 구한 16 ms 동안의 평균값을 사용하였다. (2.14)를 통한 아크 전압 예측은 주어진 조건에서 6% 이하의 오차를 보이며 이는 배전전압의 변화를 고려하지 않은 것과 측정오차로 인한 것으로 판단된다. 이러한 오차는 배전전압을 직접 측정하거나 부하에 따른 전압변화를 예측하여 고려하면 줄일 수 있다. 하지만 (2.14)는 부하가 저항 특성을 가진다는 가정과 전극간격이 고정이라는 가정하에 도출된 관계이기 때문에 일반화하여 적용하기에는 무리가 있다.

부하가 일정한 저항이 아닌 일정한 전력을 소비하는 특성을 가지는 CPL(Constant Power Load)은 (2.14)를 이용한 전압 예측의 적용이

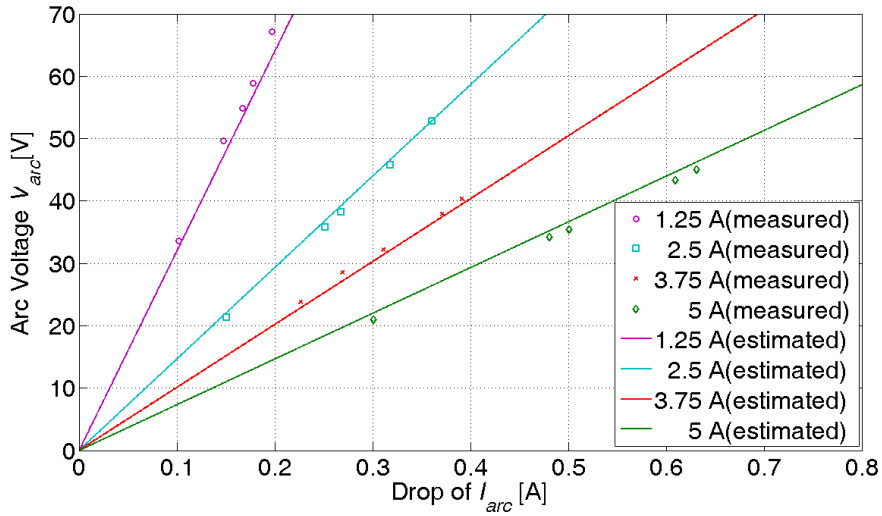


그림 2.27 아크 발생 시 전류 강하에 따른 아크 전압 변화.

어려운 대표적인 예이다. CPL의 경우 부하의 빠른 제어 동특성에 의해 아크사고 조건에서도 그림 2.24와 같은 과도특성을 기대하기 힘들며 오히려 아크사고 직후에 아크로 인한 부하 입력 전압 강하로 부하 전류가 사고 전보다 증가한다. 따라서 전류 강하 특성을 이용한 아크사고 검출의 가능성에 대해 논의하기 위해서는 부하의 동특성이 아크 전류에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

또한, 전류 강하를 이용한 아크사고 검출은 아크사고의 전극간격이 고정되어 있지 않고 변화하는 경우 적용하기 어렵다. 본 논문에서는 전극간격의 변화에 따른 아크의 전기적 특성을 파악하기 위하여 각 실험에서 전극간격을 고정하여 실험하였다. 하지만 그림 2.28과 같이 전극간격이 점차 증가하는 아크사고의 경우 초기 발생시점에 관측되는 전류 강하로 예측하는 아크 전압은 정확도가 상당히 떨어져 신뢰할 수

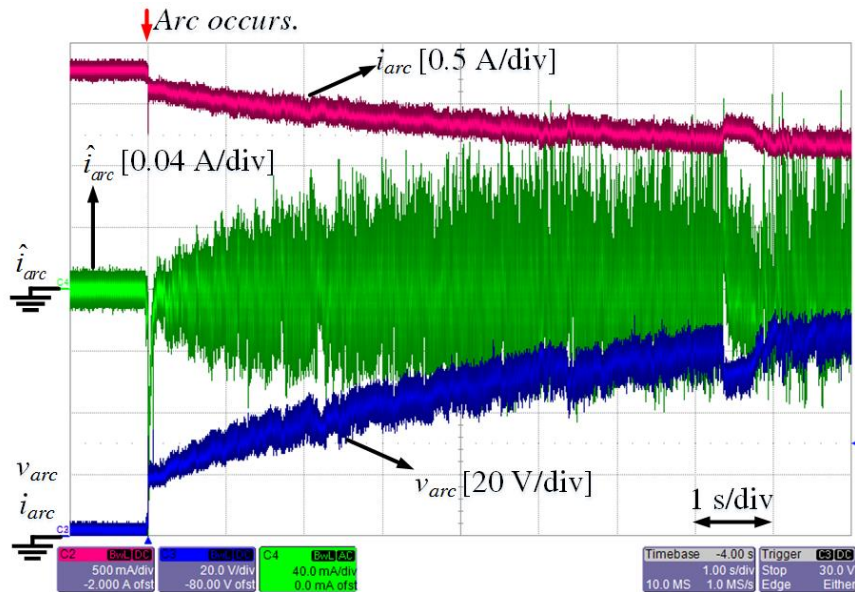


그림 2.28 전극간격 가변 시 실험 파형.

없다. 결론적으로 아크사고에서 나타나는 전류 강하를 관측하여 아크사고를 검출하거나 사고의 규모를 판단하기 위해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

#### 2.2.4.2 아크의 AC 특성을 이용한 사고 검출

2.2.4.2는 정상 상태 및 아크사고에서 나타나는 아크 전류의 AC 특성을 분석하여, 아크사고 규모 예측 및 검출에 있어 전류의 AC 성분의 활용 가능성에 대해 논의한다. AC 특성 분석은 아크사고 검출기가 전류 변압기를 통해 취득할 수 있는 전로 전류의 AC 성분에 대한 전력 스펙트럼 밀도의 대역별 특징 및 사고 유무에 따른 특성 변화에 초점을 맞춘다.

분석을 위한 데이터는 DC 성분의 경우 아크사고 발생 후 2초간의

데이터 중 무작위로 임의의 시점을 선택하여 16 ms 동안의 평균 아크 전압  $V_{arc}$ , 전류  $I_{arc}$ , 전력  $P_{arc}$  를 획득하고, AC 성분의 경우 같은 시점 아크 전류의 AC 성분 데이터를 고속 푸리에 변환하여 획득한다. 전류의 고속 푸리에 변환으로 얻어지는 전력 스펙트럼 밀도는 관측 대역에 해당하는 스펙트럼 값의 총합을 대표값으로 취하여 대표값과 아크 변수 간의 상관관계를 분석한다.

본 논문에서 전류의 주파수 특성만을 분석하는 이유는 다음과 같다. 넓은 영역에 걸쳐 운영되는 직류 마이크로그리드 환경에서 검출기 간의 통신 없이 분기별로 독립된 형태의 아크사고 검출기를 설치하는 것이 비용 효율적이다. 이 경우 독립된 형태의 아크사고 검출기가 얻을 수 있는 정보는 전로의 전압과 전류인데, 직류배전 전압은 전원공급기가 형성하는 낮은 출력 임피던스로 인해 관측지점의 전압에는 아크사고가 발생시킨 노이즈가 억제되어 아크신호의 주파수 특성이 관측되지 않을 수 있기 때문이다. 또한, 전압 정보를 통해 아크사고를 검출할 경우 주변 분기에서 발생하는 부하의 동작이나 아크사고로 인해 오작동할 가능성이 높기 때문에 전류정보에 기반을 둔 아크사고 검출기가 효용성이 높을 것으로 판단된다.

#### 2.2.4.2.1 AC 특성 분석에 적합한 주파수 대역

본격적인 분석에 앞서 아크의 AC 특성 분석에 적합한 주파수 대역에 대해 논의한다. 앞서 수행한 아크 실험으로부터 얻은 아크 발생 전과 후의 전력 스펙트럼 밀도를 비교하여 적합한 주파수 대역을 선정할 수 있다. 분석을 위해 1 MS/s로 얻어진 16,384개의 데이터의 고속 푸리에 변환을 통해 약 61 Hz의 주파수 데이터 간격을 가지고 0~500 kHz



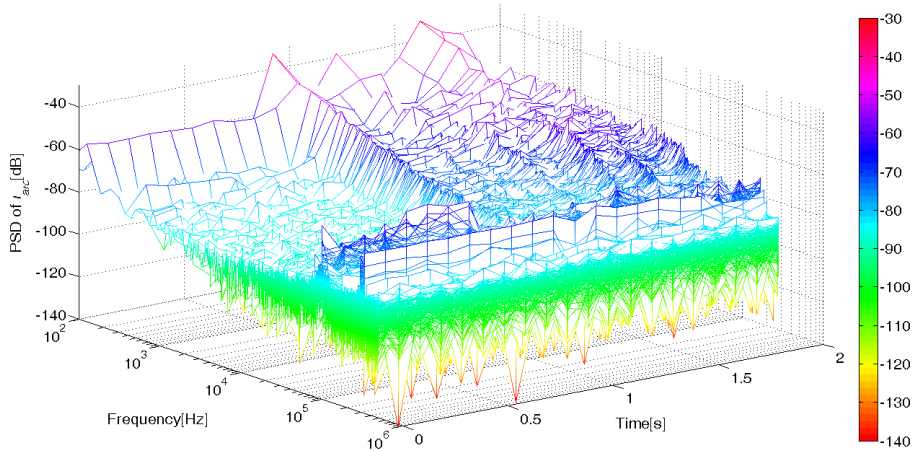


그림 2.29 시간에 따른 전류의 전력 스펙트럼 밀도 변화.

대역의 주파수 특성 관찰이 가능한 전력 스펙트럼 밀도를 얻는다.

그림 2.29는 아크 전류 3.75 A, 전극간격 0.8 mm 조건에서 0초부터 2초까지 시간의 흐름에 따른 전류의 전력 스펙트럼 밀도 변화를 0.1초 간격으로 보인 것이다. 1초에 아크사고가 발생함에 따라 넓은 대역의 전력 스펙트럼 밀도가 증가하는 현상을 통해서 AC 특성을 이용한 아크사고 검출 가능성을 확인할 수 있다. 아크사고 발생으로 인한 주파수 스펙트럼 증가는 아크가 형성되면서 나타나는 전형적인 현상으로 많은 아크사고 검출기들이 이러한 특징을 아크사고 검출에 이용한다 [23, 26, 70, 71].

그림 2.30은 그림 2.29와 동일한 데이터를 2차원 평면에 나타낸 것이다. 아크 발생에 따라 정상상태에 비해 넓은 대역에 걸쳐 주파수 스펙트럼이 증가하는 것은 확인할 수 있지만, 이산 푸리에 변환의 특성상 데이터에 노이즈가 발생하여 알아보기 어렵다 [72]. 따라서 본 논문에서는 전력 스펙트럼 밀도 데이터의 평균을 취하여 분석한다. 그림 2.31은 0.1초 간격으로 얻은 전력 스펙트럼 밀도를 아크사고 전과 후로

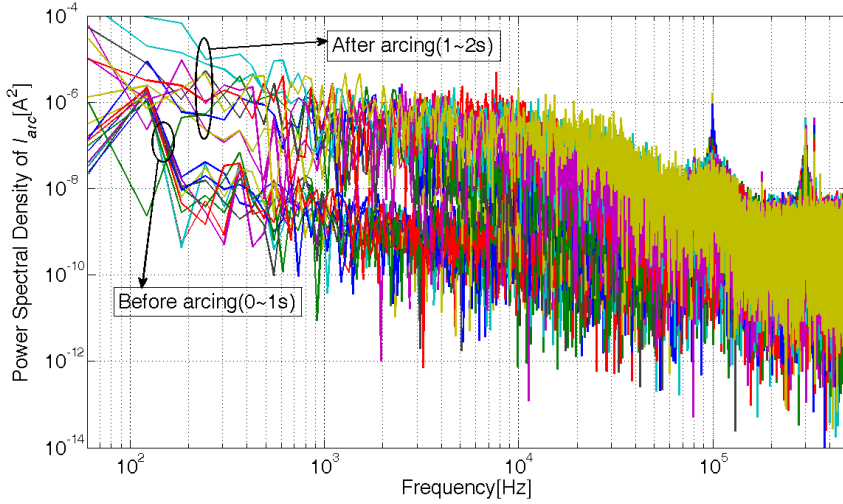


그림 2.30 2초간의 전류의 전력 스펙트럼 밀도 변화.

나누어 각각 10개씩 평균을 취한 것을 비교한다.

아크 전류의 전력 스펙트럼 밀도는 그림 2.31에 나타난 것처럼 핑크 노이즈의 특성을 보인다 [73]. 핑크 노이즈 신호는 전력 스펙트럼 밀도  $S(f)$  가 (2.15)와 같이 주파수와 반비례하여 주파수가 증가할수록 전력 스펙트럼 밀도가 감소하는 신호를 말한다.

$$S(f) \propto \frac{1}{f^\alpha} \quad (2.15)$$

(2.15)에서  $\alpha$ 의 범위는 0~2로 정의하며  $\alpha$ 가 1일 경우 전력 스펙트럼 밀도는 -10 dB/Decade의 기울기를 가진다. 사고 전과 후의 전류의 전력 스펙트럼 밀도는 그림 2.31과 같이 아크가 발생함에 따라 넓은 대역에 걸쳐 증가하지만, 핑크 노이즈 특성으로 인해 높은 주파수로 갈수록 신호가 작아져 구분이 어렵다. 약 100 kHz 지점에서 관측되는 강한 주파수 성분은 실험에서 사용한 직류배전 전압 제어용 전력변환기의

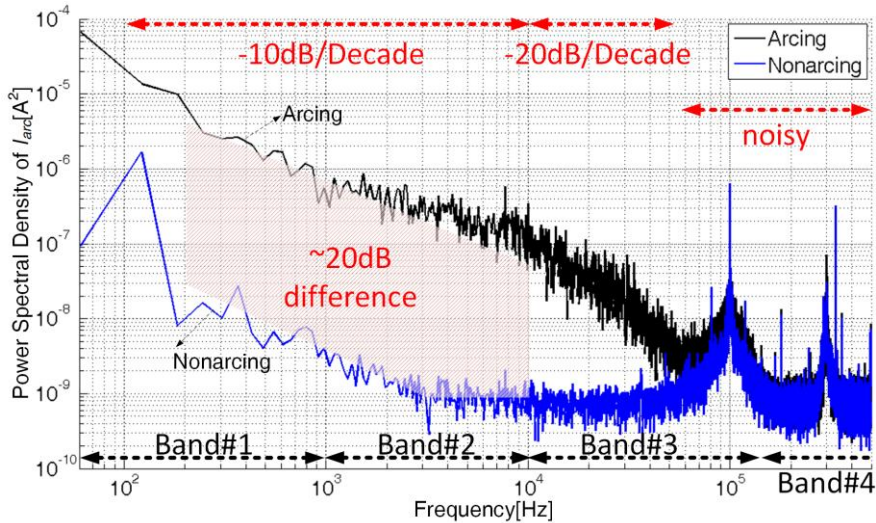


그림 2.31 정상상태 및 아크사고 시 PSD의 비교.

스위칭 주파수 특성이 나타난 것이다.

본 논문은 아크사고 검출에 사용 가능한 주파수 대역에 대한 논의를 위해 그림 2.31과 같이 주파수 대역을 4개로 나눈다. 각 밴드(Band)는 주변 환경의 영향을 받는 정도가 각기 다르므로 AC 특성 분석에 적합한가에 대한 논의가 필요하다. 먼저  $0 \sim 10^3$  Hz 대역에 해당하는 밴드#1은 정상상태와 사고상태 데이터의 차이가 커 아크 검출에 활용도가 높을 것으로 보이지만 그림 2.31에 나타난 것처럼 상용 전원으로부터 발생하는 100/120 Hz의 고조파 노이즈의 영향에 취약하여 아크사고 검출에 적용할 경우 오작동을 일으킬 가능성이 있어 아크사고 검출에 사용하기 적합하지 않다 [13]. 밴드#2는  $10^3 \sim 10^4$  Hz에 해당하는 대역으로 그림 2.31에서 볼 수 있듯이 정상상태와 아크사고 데이터 간 평균 -20 dB의 데이터 차이가 관측되어 아크사고 검출에 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다. 하지만 밴드#2에 해당하는 전력 스펙트럼 밀도는

수 kHz 구동 주파수를 가지는 전동기와 같은 전기기기의 영향을 받을 수 있으므로 이에 대한 대책이 요구된다. 밴드#3은  $10^4 \sim 1.5 \cdot 10^5$  Hz에 해당하는 대역으로 아크사고에서 정상상태에 비해 전력 스펙트럼 밀도가 크게 상승하기 때문에 아크 검출에 활용될 수 있다. 하지만 직류 마이크로그리드의 주요 부하가 되는 전력변환기의 구동 주파수가 밴드#3에 해당될 가능성이 높으므로 전력변환기 노이즈에 대한 대책이 필요하다.  $1.5 \cdot 10^5 \sim 3 \cdot 10^7$  Hz 대역의 밴드#4는 EMI(Electromagnetic Interference) 규제에 해당하는 주파수 대역이다. 현재 직류 시스템에 대한 EMI 규제가 없지만, 직류 마이크로그리드가 상용화되면서 교류에 상응하는 규제가 생겨 정상상태에서 해당 대역의 노이즈가 일정치 이하로 유지된다면 밴드#4에 대한 데이터를 통해 아크사고를 검출할 수 있을 것이다. 하지만 밴드#4에서의 전력 스펙트럼 밀도는 그림 2.31에 보인 것처럼 핑크 노이즈 특성을 가지는 아크신호가 수 kHz대역의 데이터에 비해 20 dB 이상 감쇠(Attenuation)되어 정상상태 신호와 구분하기 어렵다. 따라서 밴드#4는 아크사고 검출에 사용이 어려운 대역으로 판단된다 [74]. 또한, 밴드#4를 이용한 아크사고 검출을 위해서는 해당 대역에서 동작 가능한 고속 데이터 수집장치가 필요하므로 구현 및 비용 효율성에 있어서도 밴드#4는 아크사고 검출에 적합하지 않다.

앞선 논의에 따라 결과적으로 밴드#2와 밴드#3이 아크사고 검출에 활용 가능성이 가장 클 것으로 판단된다. 밴드#2와 밴드#3을 이용한 아크사고 검출의 방해요소로 작용하는 전력변환기 부하의 경우 동작 대역만 다를 뿐 비슷한 오작동 유발 특성을 보일 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 밴드#2와 밴드#3을 이용한 아크 검출을 전제하고 논의를 지속한다.

#### 2.2.4.2.2 아크사고 변수와 대역별 전력 스펙트럼 밀도의 상관관계

먼저 아크사고 변수와 전류의 전력 스펙트럼 밀도의 관계를 분석하기 위해 아크사고 발생 초기 2초간의 실험 데이터로부터 아크 전압, 전류, 전력의 평균값을 얻고 고속 푸리에 변환을 통해 전류의 전력 스펙트럼 밀도를 취한다. 데이터는 표 2.2에 나타난 조건당 10개의 데이터를 0.2초 간격으로 수집하여 20개의 조건에서 총 200개의 데이터를 얻었다. 전류의 전력 스펙트럼 밀도 데이터는 앞서 논의한 주파수 대역별 활용도를 검토하기 위하여 밴드별로 나누어 수집하였으며, 유용하다고 판단된 밴드#2, 밴드#3의 데이터를 각각 취득하여 분석하며 참고를 위해 밴드#1의 데이터도 제공한다. 밴드#3의 경우 그림 2.31에서 알 수 있듯이 60 kHz 이상에 해당하는 데이터는 전력변환기 스위칭 노이즈의 영향으로 사용할 수 없어 10 kHz~60 kHz에 해당하는 데이터만을 이용하여 분석하였다. 전력 스펙트럼 밀도 데이터는 밴드별 총합을 계산하여 대표값으로 표시한다. 본문에서는 검증을 위해 사용하는 밴드#3에 해당하는 데이터를 보이며, 부록에 분석한 모든 대역에 대한 데이터를 제시한다.

그림 2.32는 아크 전류와 밴드#3에 해당하는 전류의 전력 스펙트럼 밀도의 산포도이다. 그림에서 알 수 있듯 아크 전류가 증가함에 따라 전력 스펙트럼 밀도의 평균치가 증가하지만, 데이터가 집중도를 가지지 않아 뚜렷한 상관관계를 찾기 어려울 것으로 판단된다. 다른 밴드의 데이터 또한 같은 방법으로 분석하였으나 핑크 노이즈 특성을 가지는 데이터는 동일한 배수의 대역에서 같은 에너지 특성을 가지기 때문에 비슷한 경향을 보이며, 나머지 분석 결과는 부록에 제시한다 [75].

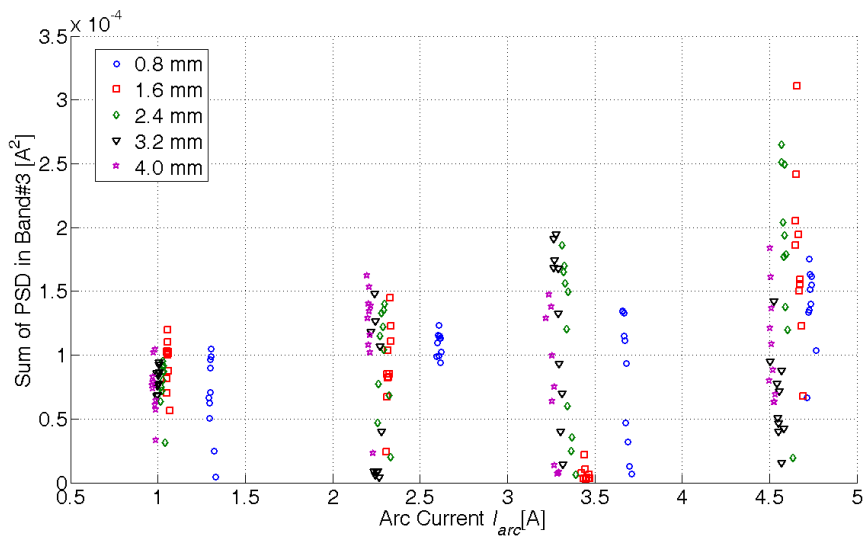


그림 2.32 아크 전류 변화에 따른 밴드#3 PSD 변화.

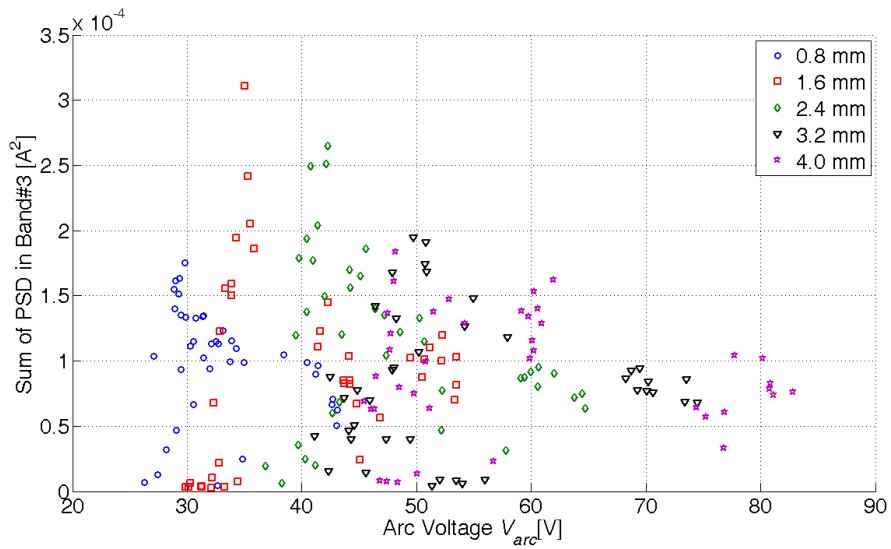


그림 2.33 아크 전압 변화에 따른 밴드#3 PSD 변화.

다음으로 아크 전압 변화와 밴드#3에 해당하는 전력 스펙트럼 밀도의 관계를 분석한다. 그림 2.33과 같이 아크 전압과 전류 전력 스펙트럼

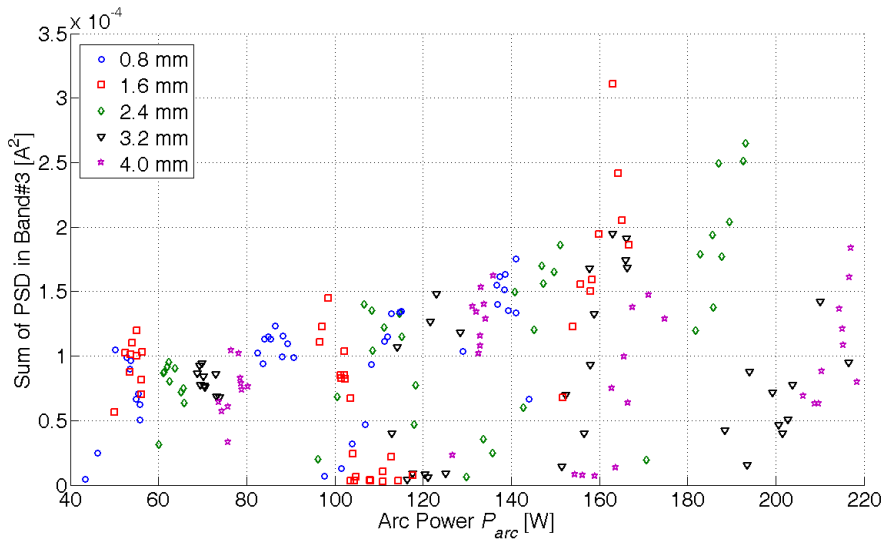


그림 2.34 아크 전력 변화에 따른 밴드#3 PSD 변화.

밀도는 아주 낮은 상관관계를 보일 것으로 예상되며 다른 대역에서도 비슷한 경향을 보인다.

그림 2.34는 아크 전력 변화와 밴드#3에 해당하는 전력 스펙트럼 밀도의 관계를 보인다. 아크사고의 규모가 커짐에 따라 전력 스펙트럼 밀도의 평균이 증가하는 것으로 보이지만 데이터의 분산이 커서 명확한 상관관계를 보이기는 어려울 것으로 판단된다.

본 논문에서는 앞서 보인 전류의 밴드별 전력 스펙트럼 밀도와 각 변수의 관계를 통계적 방법을 이용하며 분석한다. 아크 변수 변화와 전류 전력 스펙트럼 밀도의 관계를 보이기 위해 Pearson의 상관계수(Correlation coefficient)를 도입한다. Pearson의 상관계수  $r_{xy}$ 의 정의는 (2.16)과 같으며 상관계수 값에 대한 해석은 표 2.7과 같이 할 수 있으나 값이 정확히 의미하는 바에 대한 절대적인 기준은 없다[76].

표 2.7  $r$  값에 따른 Pearson 상관계수 해석.

상관계수 범위	관계의 정도
$+0.7 < r < +1.0$ or $-1.0 < r < -0.7$	강한 정적(부적) 상관관계
$+0.3 < r < +0.7$ or $-0.7 < r < -0.3$	뚜렷한 정적(부적) 상관관계
$+0.1 < r < +0.3$ or $-0.3 < r < -0.1$	약한 정적(부적) 상관관계
$-0.1 < r < +0.1$	거의 무시될 수 있는 상관관계

표 2.8 아크 전류의 전력 스펙트럼 밀도와 아크 변수의 상관계수.

변수	밴드#1	밴드#2	밴드#3
아크 전류	0.497	0.717	0.292
아크 전압	-0.07	-0.247	-0.079
아크 전력	0.664	0.816	0.311

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^N ((X[i] - \bar{X}) \cdot (Y[i] - \bar{Y}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X[i] - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Y[i] - \bar{Y})^2}} \quad (2.16)$$

(2.16)에서  $S_{xy}$  는  $x$ 와  $y$ 의 공분산(Covariance),  $S_x$  는  $x$ 의 분산을 의미한다. 표 2.8은 아크 변수와 전력 스펙트럼 밀도의 상관계수를 정리한다.

표 2.8에 보인 것처럼 아크 전류와 전력 스펙트럼 밀도는 뚜렷한 상관관계를 보인다. 하지만 전류는 분기에서 직접 취득할 수 있는 데이터이므로 큰 의미를 가지지 못한다. 또한, 그림에 보여진 아크사고 데이터의 큰 산포는 아크사고 검출 활용에 어려움으로 작용할 것을 예상할 수 있다.

만약 전력 스펙트럼 밀도가 아크 전압과 높은 상관관계를 가진다면, 아크사고의 규모를 직접 예측할 수 있으므로 아크사고 검출에 상당히 유용할 것이다. 하지만, 분석결과에서 아크 전압과 전력 스펙트럼 밀도는 모든 밴드에서 아주 낮은 상관관계를 보인다.



아크 전력과 전력 스펙트럼 밀도의 상관관계는 밴드별로 격차가 상당한데 밴드#2에서 가장 높은 상관관계를 보인다. 따라서 밴드#2의 전력 스펙트럼 밀도 데이터로 아크사고의 규모 예측을 시도할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 앞서 언급한 것처럼 모든 아크 실험 데이터는 상당히 큰 분산을 가지고 산포되어 나타나기 때문에 전력 스펙트럼 밀도를 이용한 아크사고 규모 예측은 상당한 오차를 발생시킬 것이다. 주어진 시간내에 사고를 검출해야 하는 아크사고 검출에 이와 같은 방법을 적용하기 위해서는 검출 임계치와 같은 검출기 파라미터에 충분한 여유를 두고 설계해야 한다. 하지만 설계에 충분한 여유를 두더라도 검출기의 신뢰성을 보장하기는 어려울 뿐만 아니라, 큰 예측 오차로 인해 아크사고 규모에 따라 가변된 검출시간을 적용하는 장점이 감소한다. 따라서 본 논문에서는 화재를 발생시킬 수 있어 상당한 기술적 중요도를 가지는 아크사고 검출 문제에 이와 같은 방법을 적용하기 어렵다고 판단한다.

하지만 앞서 논의한 것처럼 정상상태와 아크사고에서 전력 스펙트럼 밀도는 큰 차이를 보이기 때문에 이를 이용한 아크사고 검출의 효용성은 높다고 판단되어 이에 대한 논의를 3장에 지속한다.

## 2.3 요약

2장에서는 직류 아크사고에 대해 논의하였다. 직류에서의 아크사고는 주기적인 영점 교차가 없어 자연 소호가 어려우므로 교류에서의 아크보다 위험하다. 또한, 다양한 전원, 부하, 저장장치가 넓은 범위에 걸쳐 연계되는 마이크로그리드 시스템의 경우 전로 상 수많은 전기적 접속이

존재하므로 아크사고의 발생 가능성이 커 아크사고 검출기를 주요 분기마다 설치하여 시스템을 보호하여야 한다. 특히 직렬 아크사고는 병렬 아크사고에 비해 사고전류가 상대적으로 낮아 높은 사고전류를 발생시키지는 않지만 부하로 인해 사고전류가 제한되기 때문에 과전류 차단기로는 검출이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 기술적 어려움을 가지는 직렬 아크사고의 발화 특성 및 검출 규정에 대한 심화된 논의를 계속하였다.

2.2에서는 아크의 일반적인 특징을 논의한 후, 전기적 특징에 대한 심화된 논의를 위해 아크 모의실험 세트를 구성하여 전류, 전극간격의 변화에 따른 아크의 전기적인 특성을 DC 특성과 AC 특성으로 나누어 분석하였다. 이를 통해 각 특성을 기반으로 한 아크사고 규모 예측 및 아크사고 검출에 적용 가능성을 논의하였다.

DC 특성 분석의 주요 결과는 다음과 같다. 아크는 일정 전류에서 아크의 전극간격이 증가함에 따라 아크의 저항이 증가하는 특성을 보인다. 또한, 고정된 전극간격에서 아크의 전류가 증가함에 따라 아크의 전압은 일정 영역까지 감소하는 특성을 보이며, 대전류 영역에서는 일정 수치를 거의 유지하며 전류에 비례한다. 아크 전압은 전극간격이 증가함에 따라 계속해서 증가하지만, 전류의 증가에 따라 소폭 감소한다. 아크 전압-전류 특성을 수식으로 모델링하기 위해 Ayrton의 아크 모델을 포함한 세 가지 대표적인 아크 모델을 도입하고, 논문에서 시행한 실험결과에 적용하여 모델의 타당성을 논의하였다. 결론적으로 통신을 사용하지 않는 아크사고 검출기의 경우 단일 관측점에서 얻을 수 있는 DC 특성 정보만을 이용하여 아크사고의 규모 및 발생 여부를 예측하는 것은 어렵다.

아크의 AC 특성 분석에 대한 핵심 내용은 다음과 같다. 아크 전압을 직접 측정할 수 없는 독립된 형태의 아크사고 검출기의 사고 검출은 전류 변압기를 통해 얻을 수 있는 분기 전류를 기반으로 구현하는 것이 현실적이다. 아크 전류의 AC 특성과 관련하여 먼저 아크사고가 발생하는 순간 일어나는 전류 강하와 아크 전압의 관계에 대해서 논의하였다. 부하가 저항일 경우 사고 전 부하 등가 저항 및 전류 강하량을 통해 아크 전압을 예측할 수 있다. 하지만 직류 마이크로그리드는 전력변환기를 이용하여 연계되는 전자부하가 많으므로 부하의 빠른 동특성에 의해 분석 내용을 적용하기에는 무리가 있다. 또한, 부하가 저항특성을 가진다고 하더라도 아크의 전극간격이 고정인 아닌 가변인 조건에서는 상당한 오차가 발생할 가능성이 있다. 따라서 전류 강하 특성을 이용한 아크사고 검출의 구현을 위해서는 아크와 부하의 동특성에 대한 심화된 분석이 필요하다.

다음으로 아크 전류의 전력 스펙트럼 밀도와 아크 변수 간의 관계를 분석하였다. 전력 스펙트럼 밀도는 주파수 대역의 특징에 따라 네 개의 밴드로 나누어 각 밴드의 특징을 논의하였고, 밴드#2와 밴드#3이 아크사고 검출에 활용 가능할 것으로 판단된다. 하지만 밴드#2와 밴드#3은 마이크로그리드 전력망에 널리 사용되는 전력변환기의 노이즈가 오작동을 일으킬 수 있는 대역이므로 이에 대한 대책이 요구된다. 밴드별 전력 스펙트럼 밀도와 아크 전류, 전압, 전력의 상관관계 분석을 위해 Pearson의 상관계수를 도입하였으며, 분석결과 밴드#2의 스펙트럼 밀도와 아크 전류 및 전력의 상관계수가 상당히 높게 확인되었다. 하지만 아크 신호의 전력 스펙트럼 밀도 데이터는 상당히 큰 분산을 가지고 산포되어 있어서 전력 스펙트럼 밀도를 이용한 높은

정확도의 아크 전압이나 전력 예측은 어려울 것으로 판단된다.

### 제 3 장 직류 마이크로그리드 아크사고 검출

3장은 직류 마이크로그리드의 아크사고 검출 방법에 대해 논의한다. 아크사고 신호는 특정조건에서 정해진 값을 가지지 않고 넓은 산포를 보일 뿐만 아니라 주변 환경의 영향을 받아 정확한 모델링이 어려우므로 아크사고 검출에 대한 절대적인 해결방법을 찾기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 통계적 방법을 이용한 실험 데이터 기반의 아크사고 검출 방법을 제시한다. 통계적 방법은 아크사고와 같이 수학적 모델링이 어려운 문제에서 적용하여 신뢰성 높은 해결방법을 제시할 수 있다.

통계기법을 이용한 아크사고 검출방법을 도출하기 위하여 먼저 t검정을 통해 정상상태 데이터와 아크사고 데이터가 유의미하게 달라 구분이 가능하다는 것을 확인한다. t검정을 통해 사고 데이터의 유의미성이 확인되면, 전력 스펙트럼 밀도를 이용한 아크사고 검출이 가능하여 다음 논의가 진행될 수 있다. 다음으로 정규분포(Normal distribution) 특성을 이용한 검출 임계치 결정을 위해 정상상태 및 아크사고 데이터의 정규성(Normality)을 확인한다. 정규성 검정에서 데이터가 정규분포를 따른다고 판단되면 정규분포 특성을 바로 적용할 수 있다. 만약 정규성 검정에서 데이터가 정규분포를 따르지 않는다고 판단되면, Box-Cox 변환 또는 Johnson 변환 기법을 적용하여 데이터를 정규화한다. 정규화를 거친 데이터는 정규분포를 따르므로 정규분포 특성을 이용하여 각 조건에서 검출 임계치 변화에 따른 검출기의 미검출 및 오검출 확률의 도출이 가능하다. 이를 바탕으로 알맞은 검출 임계치와 검출방법을 통해 시스템이 요구하는 아크사고 검출기의 신뢰성을 보장할 수 있다.

다음으로 아크사고 검출기의 오작동을 일으키는 전력변환기의 구동에

대해 논의하고, 전력변환기 노이즈로 인한 오작동 억제 방법을 도출한다. 제안된 오작동 억제 방법은 전력변환기의 입력 전류에 포함되는 강한 노이즈 성분을 스위칭 주파수 억제방법을 통해 처리함으로써 노이즈가 아크사고 검출기의 동작에 영향을 미치지 않도록 한다. 결과적으로 제안된 노이즈 억제 방법과 통계적 해석을 통해 신뢰도 높은 아크사고 검출기 구현이 가능하다.

### 3.1 일반적인 아크사고 검출 방법

3.1에서는 본격적인 논의에 앞서 아크사고를 검출하는 여러 방법에 대해 논의한다. 아크사고는 교류나 직류를 가리지 않고 발생하므로 오랫동안 전기화재 원인으로 지적받아 왔으며 이에 따라 아크사고 검출에 대한 여러 연구가 선행되었다 [65, 77, 78]. 아크사고는 전압, 전류와 같은 전기적인 신호뿐만 아니라 빛, 열, 압력, 소리를 발생시키기 때문에 이러한 신호를 감지하여 사고를 검출할 수 있다. 본 논문에서는 아크사고 검출 방법에 따라서 검출법의 원리, 적용 가능 범위, 오작동의 가능성, 비용 효율성 등의 성능 평가 척도에 대해 논의하고 직류 마이크로그리드에 적용 가능성에 대해 논의함으로써 전기적 특성 변화에 기반을 둔 아크사고 검출법의 장점을 확인하고 논의를 계속한다.

#### 3.1.1 광센서를 이용한 방법

아크가 발생시키는 빛을 감지하여 사고를 검출하는 방법이다. 광센서를 이용한 아크사고 검출은 아크가 발생시키는 빛을 감지하므로 사고에 대한

빠른 응답을 기대할 수 있다 [79]. 빠른 응답특성 덕분에 광센서를 이용한 검출은 화재 발생 전에 시스템을 보호할 수 있다는 장점이 있지만, 빛의 변화를 감지하여 사고를 검출하므로 밀폐된 공간에서 적용은 가능하지만 주변광의 영향을 받는 개방된 환경에서는 오작동 확률이 높아 사용이 어렵다는 단점이 있다. 또한, 검출 특성상 한 개의 검출기가 감당할 수 있는 영역이 한정되기 때문에 직류 마이크로그리드와 같은 넓은 범위에 적용하는데 어려움이 따른다 [78, 80].

### 3.1.2 온도 센서를 이용한 방법

아크 발생에 따른 주변 온도 상승을 이용한 사고 검출 방법이다. 온도 센서를 이용한 방법은 사고 확률이 높은 지점에 설치하여 시스템을 보호하는데 효과적이다. 하지만, 접촉식 온도 센서 사용 시 고온의 아크에 의해 온도 센서 및 구동 회로가 손상을 입어 검출불가 상황이 생기거나 재사용이 불가능한 단점이 있다. 이미지 프로세싱을 이용한 대안이 있지만 신뢰도가 낮고 넓은 영역에 사용하기 어렵다는 것이 단점이다. 결과적으로 온도 센서를 이용한 아크 검출 방법 또한 직류 마이크로그리드와 같은 시스템에 적용하는데 한계가 있다 [81].

### 3.1.3 압력의 변화를 감지하는 방법

아크가 발생시키는 압력 변화를 감지하는 방법으로 압력 변화가 즉각 반영되는 밀폐된 공간에 적용 가능하다. 하지만 미세한 압력 변화 감지를 위해 고성능의 소자가 필요하다는 단점이 있어 비용 문제를 야기한다. 따라서 이 방법은 높은 신뢰성을 요구하는 잠수함과 같은 제한된

영역에서만 사용되어 왔다. 또한, 압력 변화에 기반을 둔 아크사고 검출법은 개방된 공간에 적용이 불가능하여 직류 마이크로그리드에 적용하기 어렵다 [78].

### 3.1.4 음향신호를 감지하는 방법

아크 방전은 빛, 소리 뿐만 아니라 기계적인 진동 또한 발생시키므로, 발생한 진동에 따라 생성된 음향신호를 감지하여 아크사고 검출이 가능하다 [82]. 관측 신호로부터 사고 특성이 잘 나타나는 주파수대역을 선별하여 검출을 시도하며, 이 대역은 10 k~300 kHz에 해당하는 초음파 대역으로 압전 소자(Piezoelectric devices)를 이용하여 검출할 수 있다 [83]. 하지만, 검출 특성상 주변 노이즈에 취약하여 오작동 확률이 높은 것이 단점이며 따라서 통제된 영역에서의 제한된 적용이 바람직하다.

### 3.1.5 전기 신호를 감지하는 방법

아크사고가 발생시키는 전압, 전류의 변화에 기반을 둔 검출법이다. 전기 신호의 전도성을 이용하므로 빠른 반응속도뿐만 아니라 넓은 범위에 적용 가능하다는 장점을 가진다. 따라서 마이크로그리드에 적용 가능성이 가장 큰 검출 방법으로 고려된다. 하지만 대상 시스템이 복잡해짐에 따라 외란의 영향을 받을 가능성이 커지므로 이에 대한 대책이 필요하다 [84, 85]. 특히 직류 마이크로그리드와 같이 다양한 전원 및 부하가 연결될 뿐만 아니라 확장 가능성이 큰 시스템에 적용을 위해서는 외란에 강인한 지능적인 검출법이 요구된다.



### 3.1.6 아크사고 검출 방법 정리

아크사고가 발생할 때 나타나는 여러 변화에 기반을 둔 사고 검출법을 검토한 결과 전기 신호 변화를 이용한 방법이 마이크로그리드 시스템에 적합하다는 결론을 얻었다. 아크가 발생시키는 전기 신호 변화는 전압, 전류에 즉각적으로 나타나기 때문에 신속한 사고 검출을 기대할 수 있지만 외란에 의한 오작동 가능성이 존재하므로 노이즈에 강인한 검출 방법의 도출이 필요하다.

## 3.2 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출 방법

앞서 논의한 것처럼 아크사고로부터 얻어지는 데이터는 산포가 크므로 절대적인 해법을 찾기 어렵다. 3.2는 이러한 조건에서 높은 신뢰성을 가지는 아크사고 검출기를 도출하기 위해 통계기법을 이용한 해결방법을 제시한다. 논문에서 제시하는 통계기법을 이용한 문제 해결은 아크사고 문제뿐만 아니라 수학적 해석이 불가능하여 절대적 해법을 찾기 어려운 문제에 효과적인 해결방법을 제시한다.

통계적 방법을 이용한 아크사고 검출에 대한 논의는 2장의 아크 모의실험으로부터 얻은 정상상태 및 아크사고 데이터의 정규성 검정으로 시작된다. 정상상태 및 아크사고 데이터에 대한 정규성 검정에서 데이터의 정규성이 확인되면 확률분포를 이용해 검출 임계치 변화에 따른 미검출 및 오검출 확률을 도출해 낼 수 있다. 만약 데이터가 정규성을 따르지 않는다면, 데이터 변환을 통해 정규성을 따르도록 하여 통계적으로 분석할 수 있다. 본 논문에서는 데이터 정규화를 위해 Box-

Cox 변환과 Johnson 변환을 적용한다. 다음으로 t검정을 통해 정상상태 데이터와 아크사고 데이터 간 유의미한 차이가 존재하여 구별 가능함을 확인한다. t검정의 p값이 유의확률보다 작으면 두 데이터 집단 간 유의미한 차이가 있는 것으로 판단한다. 마지막으로 모든 조건에서 임계치 변화에 따른 미검출 및 오검출 확률 분포를 고려하여 아크사고 검출기의 검출 임계치 및 검출방법을 결정한다. 오작동 확률 분포를 통해 1회 샘플링에서 얻을 수 있는 검출 확률의 한계를 확인하고, 이에 대한 보완이 가능하도록 검출방법을 설계함으로써 시스템 요구조건에 맞는 아크사고 검출기의 구현이 가능하다.

3장에서 사용되는 데이터는 2장의 아크 모의실험으로부터 얻는다. 각 실험 조건에서 아크사고 발생 전과 후의 전류 데이터로부터 정상상태 및 사고상태 데이터를 얻는다. 정상상태 데이터는 아크사고 발생 전 무작위의 시점부터 16 ms간의 데이터를 취하여 얻고, 사고상태 데이터는 아크사고 발생 후 2초간의 데이터 중 무작위의 시점부터 16 ms간의 데이터를 취하여 얻는다. 각 데이터는 고속 푸리에 변환을 통해 전력 스펙트럼 밀도로 변환하고 검출에 사용할 대역에 해당하는 데이터의 합을 얻어 분석 대상으로 삼는다. 통계적 분석을 위하여 각 실험 조건마다 정상상태와 사고상태 데이터를 각각 60개씩 얻고, 결과적으로 20개의 실험 조건에서 40세트(Set)의 데이터를 얻어 통계적으로 분석한다. 분석 주파수 대역은 2장과 같이 밴드#3에 해당하는 10~60 kHz 대역의 데이터를 사용한다.

### 3.2.1 아크사고 데이터의 정규성 검정 및 정규화

3.2.1은 40세트로 이루어진 정상상태 및 사고상태 데이터에 대한 정규성 검정 및 정규화를 수행한다. 대표적인 정규성 검정방법은 Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Kolmogorov-Smirnov가 있다. Anderson-Darling 검정은 정규성에 대해 경험적 누적분포함수(ECDF, Empirical Cumulative Distribution Function)를 기초로 하는 정규성 검정방법으로 3가지 검정 중 가장 엄격한 기준(낮은 유의 수준)으로 정규성을 판별하므로 높은 중요도를 가지는 데이터를 다룰 때 쓰인다. Ryan-Joiner 검정은 상관 계수를 기초로 하는 검정으로 Shapiro-Wilk 검정과 유사한 특성을 가지며 중간수준의 엄격함을 가지는 검정이다. Kolmogorov-Smirnov 검정은 표본 데이터의 경험적 누적분포함수와 데이터가 정규일 경우 예상되는 분포를 비교하여 정규성을 판별하는 검정법으로 데이터가 1,000개 이상으로 충분히 많을 때 사용된다.

본 연구는 아크사고 검출의 중요도를 고려하여 가장 엄격한 기준을 가지는 Anderson-Darling 검정을 사용한다. 정규성 검정은 통계 소프트웨어(Software) Minitab을 통해 수행하며,  $p$ 값의 크기로 정규성을 확인한다. 검정결과  $p$ 값이 유효확률 0.05보다 크면 해당 데이터는 정규분포를 따른다고 할 수 있으며,  $p$ 값이 유효확률보다 작으면 데이터가 정규분포를 따르지 않는다고 할 수 없어 정규화가 필요하다.

그림 3.1은 전류 1.25 A, 전극간격 0.8 mm 조건에서 얻은 정상상태 데이터의 정규성 검정 결과이다. 검정 결과  $p$ 값이 0.754로 유의 수준 0.05보다 크기 때문에 데이터가 정규분포를 따른다고 본다. 이와 같은 경우 별도의 추가 과정 없이 정규분포의 특성을 적용하여 검출 확률

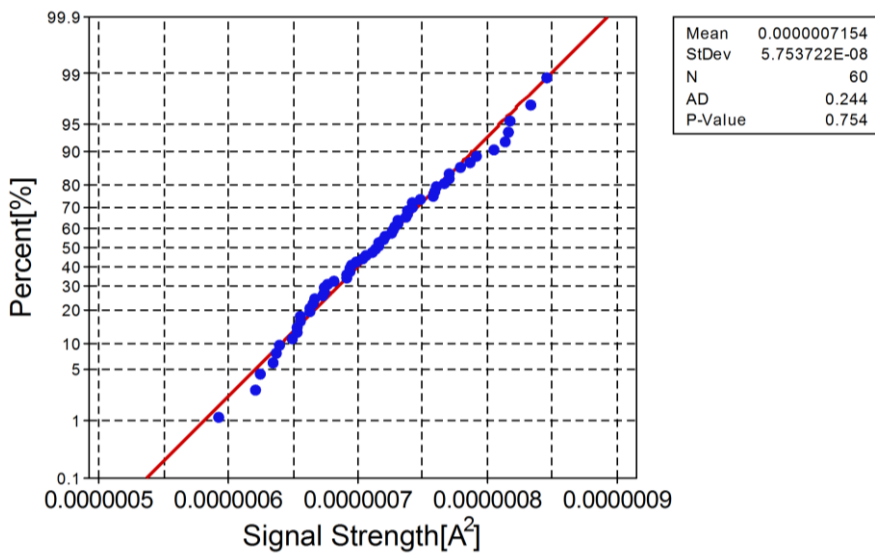


그림 3.1 정상상태 데이터(1.25 A/0.8 mm)의 정규성 검정 결과.

분석이 가능하다.

데이터가 정규성을 따르지 않을 경우 정규분포 특성을 이용할 수 없으므로 변환을 통해 데이터를 정규화한다. 그림 3.2는 전류 1.25 A, 전극간격 1.6 mm 조건에서 사고상태 데이터의 정규성 검정 결과이다. 그림에 나타난 것처럼 Anderson-Darling 검정에서  $p$ 값이 0.005 이하로 유의확률 0.05보다 낮아 정규분포를 따른다고 볼 수 없다. 데이터 정규화를 위해 Box-Cox 변환 또는 Johnson 변환을 사용할 수 있는데 본 논문에서는 먼저 상대적으로 간단한 Box-Cox 변환을 적용하여 정규화를 시도하고 Box-Cox 변환으로 정규화가 어려울 때 Johnson 변환을 적용한다.

Box-Cox 변환은 데이터를  $\lambda$  제공한 값으로 변환하여 정규화한다. 이 변환 방법은 비교적 간단한 연산으로 정규화가 가능하다는 장점이 있지만

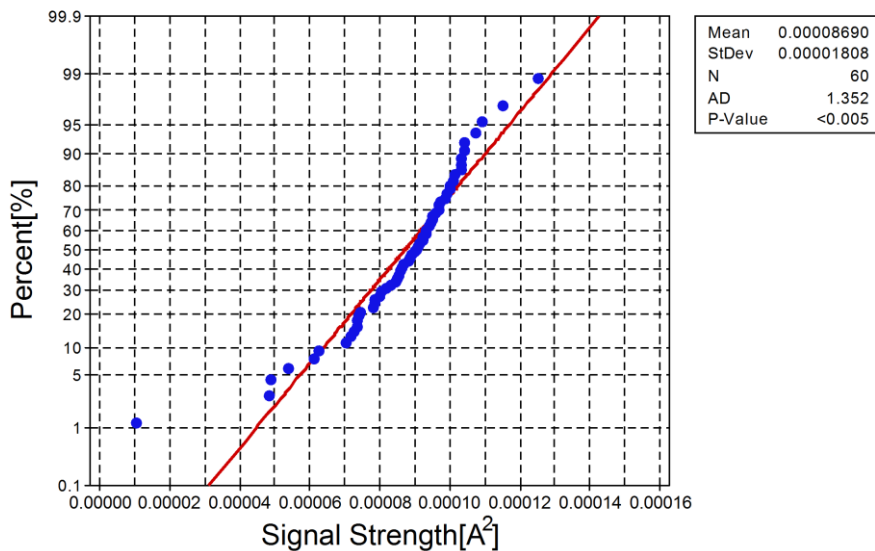


그림 3.2 아크사고 데이터(1.25 A/1.6 mm)의 정규성 검정 결과.

모든 데이터가 양수여야만 적용이 가능하다는 단점과 정규화 성공률이 비교적 낮다는 단점이 있다. Minitab에서 제공하는 Box-Cox 변환은 그림 3.3과 같이  $\lambda$ 의 변화에 따른 표준편차(Standard deviation)의 변화를 그래프로 보이며 표준편차를 최소로 만드는 최적  $\lambda$ 값을 제공한다. 만약 최적  $\lambda$ 가 1에 가까우면 변환 데이터가 원본 데이터와 큰 차이가 없어 정규화에 성공할 확률이 낮다. 만약 최적  $\lambda$ 가 0.5에 가까운 값이라면  $\lambda$ 를 0.5로 근사하여 연산을 간단하게 할 수 있다.

그림 3.3은 그림 3.2에 보인 데이터의 Box-Cox 변환 결과를 보인다. 변환 결과, 표준편차를 최소로 하는 최적  $\lambda$ 는 1.56으로 데이터를 1.56 제곱하여 변환하고 다시 정규성 검정을 수행한다. 그림 3.4는 Box-Cox 변환한 데이터의 정규성 검정 결과이다. Box-Cox 변환 결과  $p$ 값이

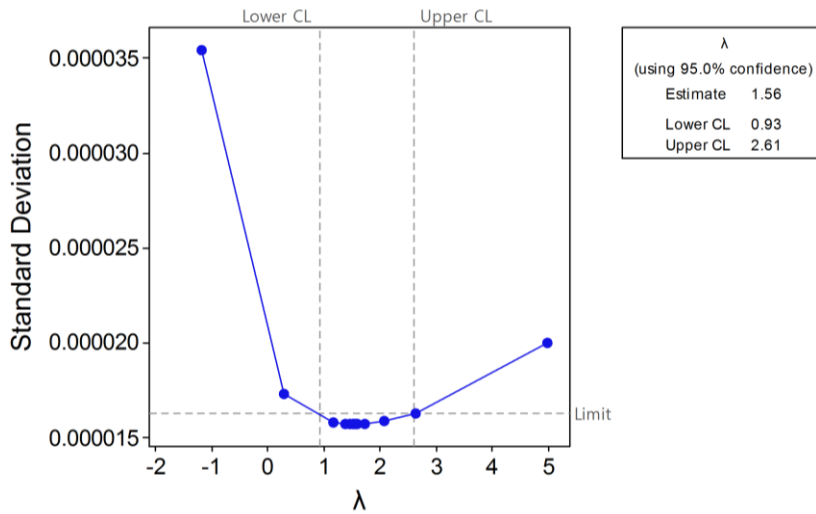


그림 3.3 아크사고 데이터(1.25 A, 1.6 mm)의 Box-Cox 분석 결과.

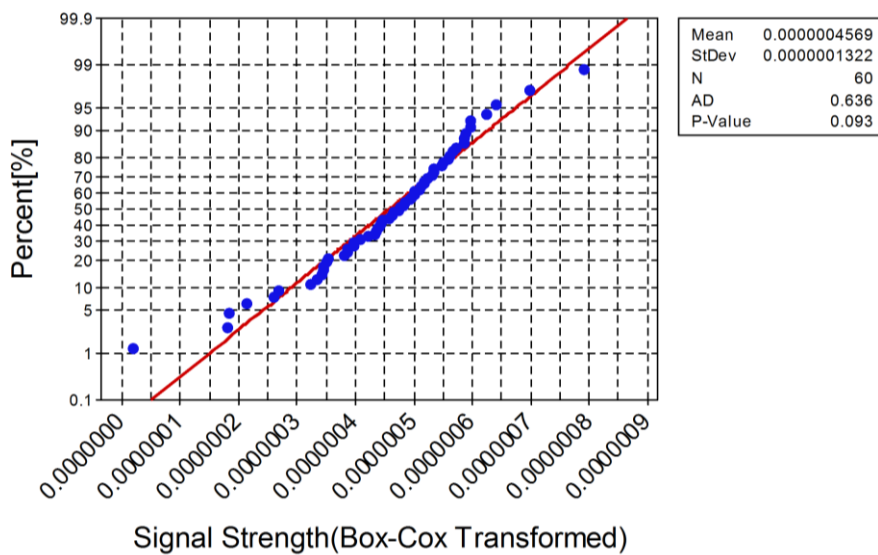


그림 3.4 Box-Cox 변환된 아크사고 데이터(1.25 A, 1.6 mm)의 정규성 검정.

0.05보다 크므로 변환된 데이터는 정규분포라 할 수 있으며, 따라서 정규분포 특성을 적용한 논의가 가능하다.

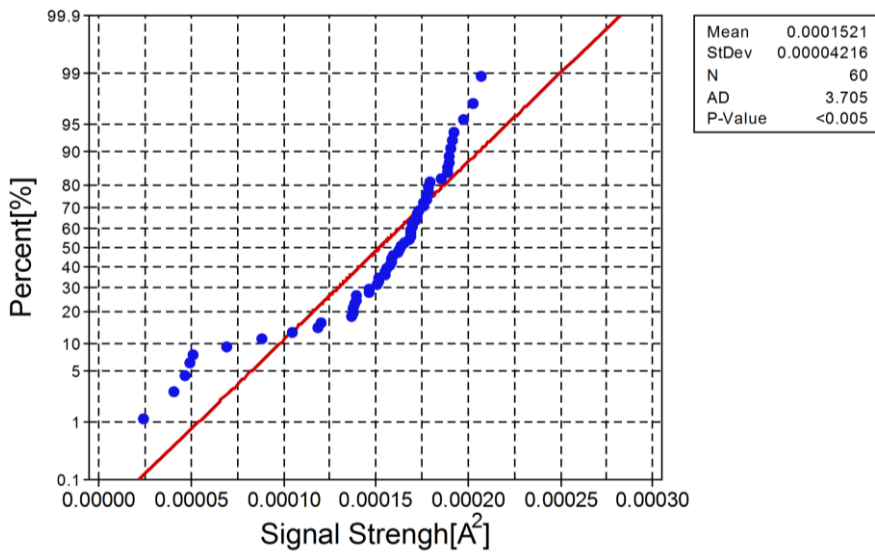


그림 3.5 아크사고 데이터(3.75 A, 1.6 mm)의 정규성 검정 결과.

데이터를  $\lambda$  제공하여 정규화하는 Box-Cox 변환은 간단하지만 모든 데이터를 정규화할 수 있는 것은 아니다. 다음은 Box-Cox 변환으로 정규화가 가능하지 않은 경우의 예를 제시한다. 그림 3.5는 전류 3.75 A 및 전극간격 1.6 mm 조건의 아크사고 데이터에 대한 정규성 검정 결과이다. 그림에 보인 것처럼 해당 데이터는 p값이 0.005이하로 정규분포라 할 수 없다. 따라서 Box-Cox 변환을 통해 정규화를 시도한다.

Box-Cox 변환 후 해당 데이터는 그림 3.6에 보인 것처럼 최적  $\lambda$ 가 1.7이므로 원본 데이터를 1.7 제곱하여 데이터를 변환하고 다시 정규성 검정한다. 그림 3.7은 Box-Cox 변환한 데이터를 정규성 검정한 결과이다. 정규성 검정 결과 Box-Cox 변환으로 데이터가 바뀌었지만, 여전히 p값이 유의 수준보다 낮아 해당 데이터는 정규분포라 할 수 없다. 이런 경우 좀 더 복잡한 형태의 정규화 방법인 Johnson 변환을 사용하여

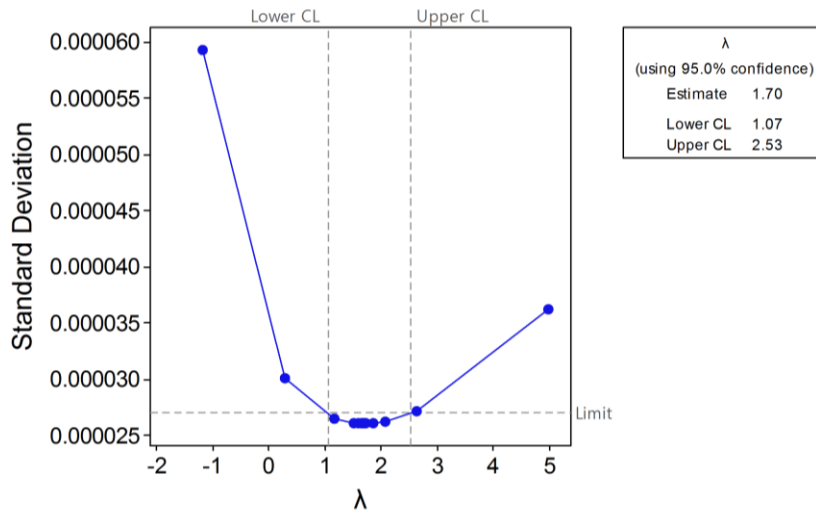


그림 3.6 아크사고 데이터(3.75 A, 1.6 mm)의 Box-Cox 분석 결과.

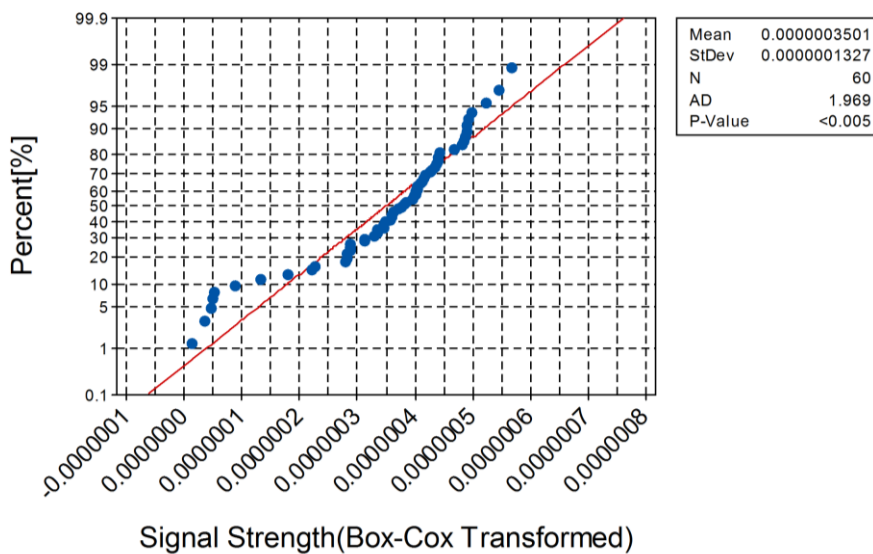


그림 3.7 Box-Cox 변환된 아크사고 데이터(3.75 A, 1.6 mm)의 정규성 검정.

데이터를 정규화 할 수 있다.

Johnson 변환은 SB(Bounded), SL(Lognormal), SU(Unbounded) 세 종류의 함수 중 데이터 특성에 알맞은 함수를 하나 선택하고, 데이터를



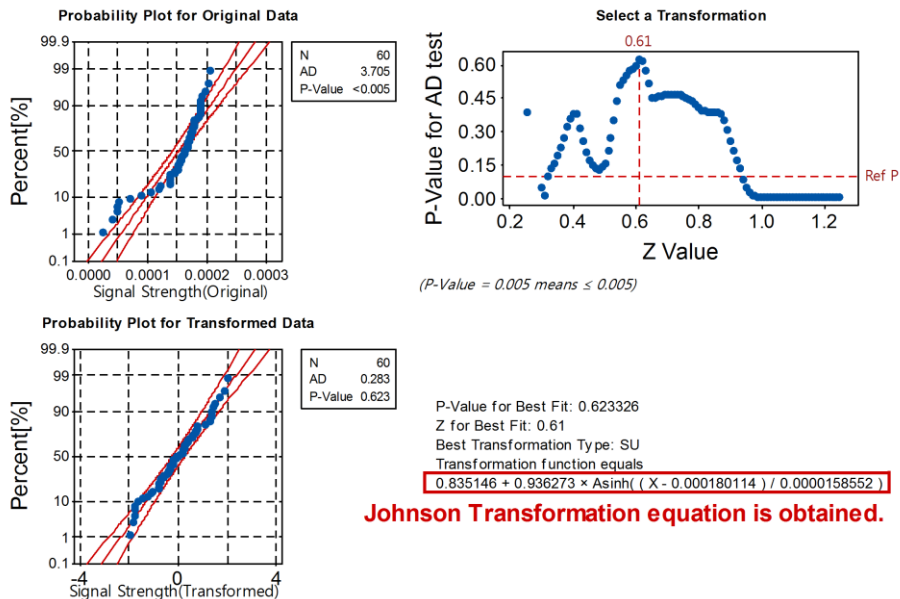


그림 3.8 아크사코 데이터(3.75 A, 1.6 mm)에 대한 Johnson 변환.

임의의 함수를 통해 변환함으로써 정규분포를 따르도록 변환한다 [86]. Johnson 변환에서 B는 자연로그함수, L은 지수함수, U는 쌍곡선함수를 의미하며, 셋 중 하나의 함수를 이용한 데이터 변환을 수행한다. Johnson 변환은 성공률이 높은 효과적인 정규화 방법이지만, 모든 데이터를 정규화 가능한 상태로 만들 수 있는 방법은 아니다. 경우에 따라 복잡한 수식에 의한 Johnson 변환보다 Box-Cox 변환이 더 효과적인 경우도 존재할 수 있다.

그림 3.7에 보인 데이터는 Box-Cox로 정규화할 수 없으므로 Johnson 변환을 시도한다. 그림 3.8은 해당 데이터에 대한 Johnson 변환의 결과를 보인다. 그림에 보인 것처럼 p값이 0.005이하로 정규성을 보이지 않던 데이터가 변환 후 p값이 0.623으로 증가하여 정규분포로 볼

표 3.1 실험 데이터(밴드#3)의 정규성 검정 결과 및 변환 방법.

정상상태 조건	검정결과/변환	사고상태 조건	검정결과/변환
1.25 A	0.754/-	1.25 A/0.8 mm	0.829/-
1.25 A	0.659/Johnson	1.25 A/1.6 mm	0.093/Box-Cox
1.25 A	0.954/Johnson	1.25 A/2.4 mm	0.475/-
1.25 A	0.921/Johnson	1.25 A/3.2 mm	0.309/-
1.25 A	0.270/-	1.25 A/4.0 mm	0.450/-
2.5 A	0.266/Box-Cox	2.5 A/0.8 mm	0.904/Johnson
2.5 A	0.645/Box-Cox	2.5 A/1.6 mm	0.175/-
2.5 A	0.067/Box-Cox	2.5 A/2.4 mm	0.117/Box-Cox
2.5 A	0.845/Johnson	2.5 A/3.2 mm	0.456/Johnson
2.5 A	0.918/Johnson	2.5 A/4.0 mm	0.074/Box-Cox
3.75 A	0.581/Johnson	3.75 A/0.8 mm	0.065/-
3.75 A	0.164/Box-Cox	3.75 A/1.6 mm	0.623/Johnson
3.75 A	0.948/Johnson	3.75 A/2.4 mm	0.375/Johnson
3.75 A	0.335/-	3.75 A/3.2 mm	0.191/Johnson
3.75 A	0.860/Johnson	3.75 A/4.0 mm	0.839/Johnson
5 A	0.104/Box-Cox	5 A/0.8 mm	0.204/-
5 A	0.829/Johnson	5 A/1.6 mm	0.434/Johnson
5 A	0.214/Johnson	5 A/2.4 mm	0.253/Johnson
5 A	0.741/Johnson	5 A/3.2 mm	0.134/-
5 A	0.133/Box-Cox	5 A/4.0 mm	0.111/-

수 있게 되었다. 제시된 데이터의 경우 최적의 함수는 SU로 쌍곡선함수에 의해 정규화 할 수 있으며, 데이터 변환 기준은 그림 하단에 나타난 수식을 통해 알 수 있다.

본 논문에서는 2장에서 수행한 20회의 실험에서 획득한 정상상태 및 아크사고에서 얻어진 40세트의 데이터를 모두 정규성 검정하였다. 검정에서 유의 수준이 낮아 정규분포라 할 수 없는 데이터의 경우 Box-Cox 또는 Johnson 변환을 통해 정규화하여 정규분포 특성을 이용한 분석이 가능하도록 했다. 표 3.1은 변환없이 정규분포라 할 수 있는 데이터의 경우 첫 번째 검정의 p값을 제시하고, 변환을 통해 정규성이

표 3.2 실험 데이터(밴드#3)의 t검정 결과(자유도 59).

조건	검정결과(t/p)	조건	검정결과(t/p)
1.25 A/0.8 mm	-29.15/1E-36	3.75 A/0.8 mm	-30.26/1E-37
1.25 A/1.6 mm	-36.94/2E-42	3.75 A/1.6 mm	-35.85/3E-42
1.25 A/2.4 mm	-45.03/2E-47	3.75 A/2.4 mm	-21.53/1E-29
1.25 A/3.2 mm	-38.92/9E-44	3.75 A/3.2 mm	-16.19/2E-23
1.25 A/4.0 mm	-51.45/1E-50	3.75 A/4.0 mm	-20.40/2E-28
2.5 A/0.8 mm	-35.85/9E-42	5 A/0.8 mm	-45.00/2E-47
2.5 A/1.6 mm	-15.83/7E-23	5 A/1.6 mm	-34.35/1E-40
2.5 A/2.4 mm	-34.52/8E-41	5 A/2.4 mm	-20.66/1E-28
2.5 A/3.2 mm	-14.92/1E-21	5 A/3.2 mm	-14.07/2E-20
2.5 A/4.0 mm	-43.90/9E-47	5 A/4.0 mm	-18.70/2E-26

확보된 경우 사용한 변환의 종류와 결과적인 p값을 제시한다. 데이터 분석 및 정규화 결과, 20세트 데이터 모두 정규분포로 가정할 수 있어 통계적 방법을 이용한 아크사고 검출기 도출이 가능하다는 결론을 얻는다.

### 3.2.2 아크사고 검출 적용 가능성 확인을 위한 t검정

t검정은 두 집단의 평균이 통계적으로 유의미한 차이가 있는지를 검정하는데 사용할 수 있는 방법이다 [76]. 3.2.2는 t검정을 통해 정상상태의 신호와 아크사고 신호가 구별이 가능하다는 것을 확인하여, 다음 논의할 내용인 아크사고 검출기 설계를 진행할 수 있도록 한다. t검정 결과 p값이 유의 수준 0.05 이하의 수치가 나오면 두 데이터가 유의미한 차이가 있다고 판단되기 때문에 정상상태와 사고상태를 명확하게 구별할 가능성이 높다. 본 논문에서는 20개 실험 조건에서 각각 정상상태와 사고상태 데이터의 t검정 결과(t값과 p값)를 표 3.2에 정리하였다. 표에 보인 것처럼 모든 검정의 결과 p값이 0.05보다 훨씬

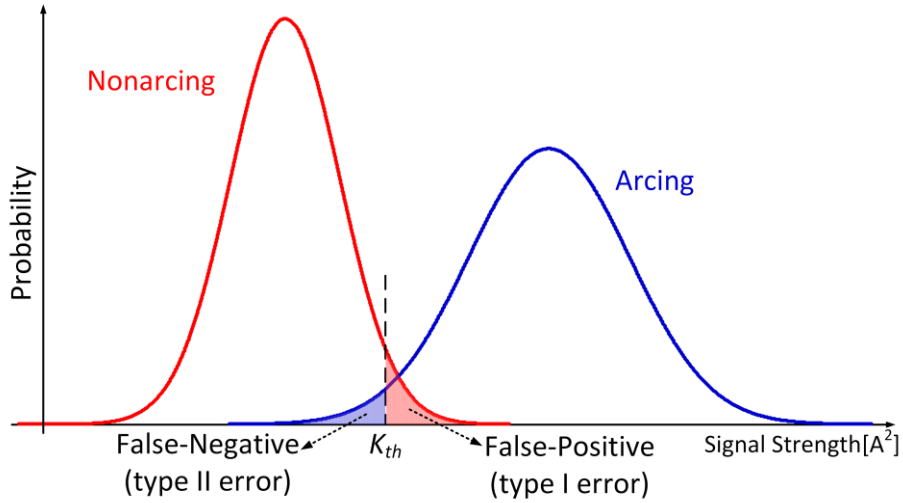


그림 3.9 임계치 변화에 따른 아크사고 검출기의 동작.

작으므로 모든 조건에서 전력 스펙트럼 밀도로부터 아크사고와 정상상태를 구별할 수 있다는 논리가 성립한다.

### 3.2.3 통계기법을 이용한 아크사고 검출 방법 도출

3.2.3은 실험 데이터 세트를 기반으로 아크사고 검출기의 검출 신뢰성을 최적화하는 방법에 대해서 논의한다. 그림 3.9는 통계적 방법을 이용한 아크사고 검출 방법에 대한 개념을 설명하기 위해 정상상태 및 아크사고 데이터의 확률분포 예를 보인다. t검정의 결과로 예상할 수 있는 것처럼 정상상태와 아크사고 데이터의 분포는 평균이 유의미한 차이를 보이므로, 그림과 같이 두 데이터를 명확하게 구분할 수 있다. 하지만, 그림 3.9와 같이 정상상태와 아크사고에서 데이터 값은 고정된 값을 가지지 않고 값의 확률분포가 정규분포를 따르므로 검출 임계치  $K_{th}$ 를 결정하여 두 신호를 구분하게 된다.

표 3.3 아크사고 검출기의 사고 검출 동작 정리.

		실제상태	
		아크	정상
검출기 판단	아크	정상동작	오검출(False-Positive)
	정상	미검출(False-Negative)	정상동작

앞선 논의에 따라, 정상상태와 아크사고 신호는 정규분포를 따르므로 임계치 결정에 따라 두 신호를 구별하는 확률이 달라져 사고 검출과 오작동 확률이 결정된다. 사고 발생 여부 및 검출기 판단에 따른 검출 동작에 대해 본 연구에서 정의한 용어는 표 3.3과 같다. 미검출은 아크사고 검출기가 임계치  $K_{th}$ 를 기준으로 사고 발생 여부를 판단함에 따라 신호 크기가 임계치보다 작은 사고의 경우 아크사고가 발생했음에도 불구하고 정상상태로 판단하는 것을 말한다. 미검출은 통계 용어로 2종 오류(Type II error) 또는 거짓음성(False-negative)이다. 오검출은 정상상태에서 신호 크기가 임계치보다 커 아크사고 검출기가 사고상태로 판단하는 것을 말한다. 오검출은 통계 용어로 1종 오류(Type I error) 또는 거짓양성(False-positive)이다.

미검출과 오검출 확률은 그림 3.9처럼 임계치 변화에 따라 하나가 감소하면 다른 하나는 증가하는 상충관계를 가지므로 각각의 오작동이 미치는 영향을 고려하여 임계치를 신중하게 결정하여야 한다. 사고에 대한 미검출은 시스템에 치명적인 화재 사고를 발생시키므로 최소화 하는 것이 좋다. 반면, 정상상태에서의 오검출은 보호기재 동작으로 불필요한 구성요소 차단을 발생시켜 사용자의 불편을 증가시킬 뿐만 아니라 시스템 유지보수 비용 증가 및 이윤 감소로 직결되기 때문에 오검출의 억제 또한 중요하다.

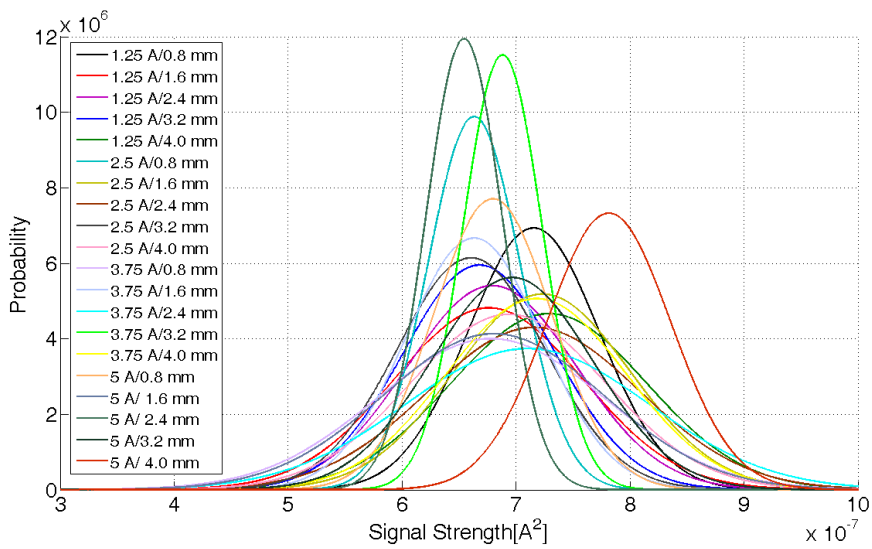


그림 3.10 정상상태 데이터의 확률분포.

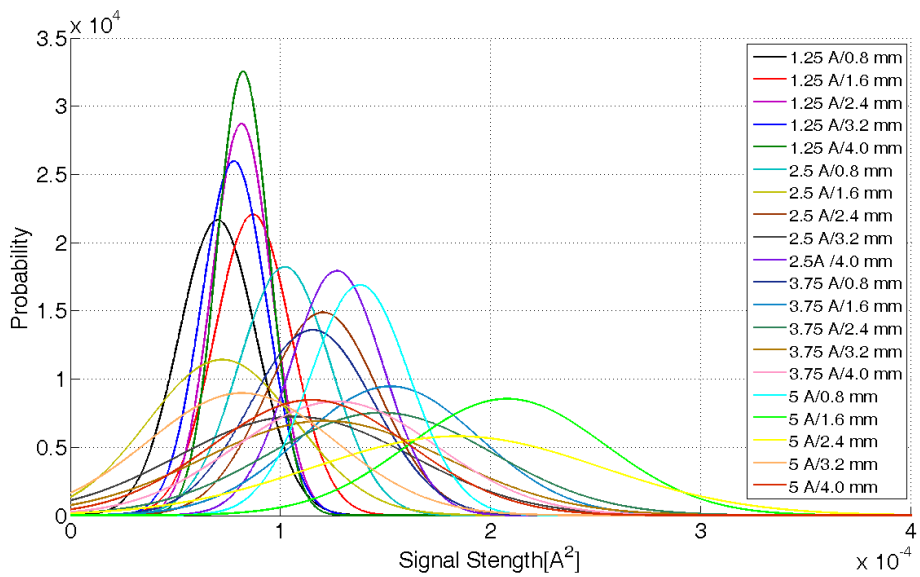


그림 3.11 사고상태 데이터의 확률분포.

본 논문에서는 통계적 방법을 이용하여 실험 데이터를 기반으로 한 검출기 임계치 결정에 대해 논의한다. 그림 3.10과 그림 3.11은 각각

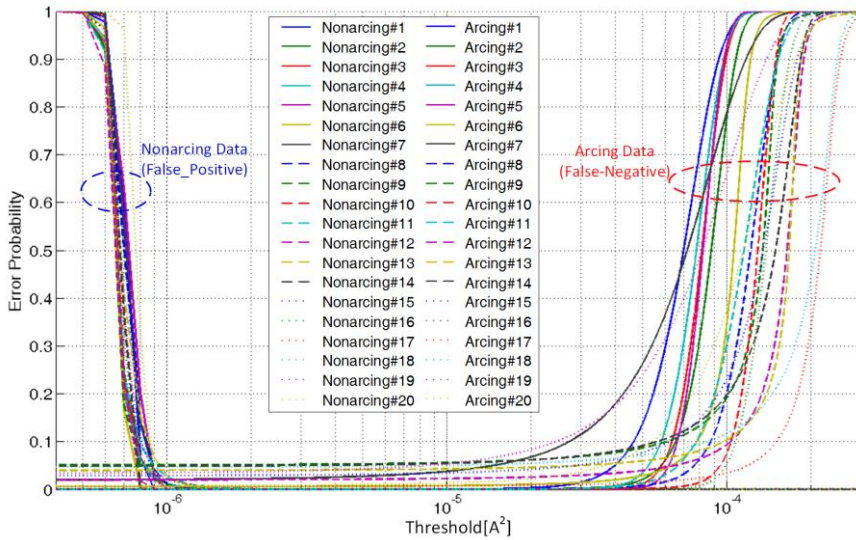


그림 3.12 검출 임계치 변화에 따른 미검출 및 오검출 확률.

정상상태와 사고상태 데이터의 분포를 보인다. 사고상태 데이터는 아크가 발생함에 따라 산포가 증가하여 정상상태보다 큰 표준편차를 보인다. 그림에서 알 수 있듯 정상상태와 사고상태 데이터는 각각 일정영역에 밀집된 형태를 보이며, 두 그룹 간의 평균 차이가 상당히 커 두 집단의 차이가 명확하다고 판단된 t검정의 결과와 일치한다.

그림 3.12는 정상상태 및 사고상태 조건에서 검출 임계치 변화에 따른 오검출 및 미검출 확률을 보인다. 정규화를 위해 변환된 데이터의 경우 변환에 의해 검출 임계치와 직접 대응할 수 없기 때문에, 이 경우 오작동 확률 도출을 위해 임계치 또한 해당 데이터와 동일한 변환을 수행하여 같은 차원에서 오작동 확률을 도출하였다. 앞서 논의한 것처럼 사고 검출률을 높이기 위해 검출 임계치를 낮추면, 그림 3.12와 같이 미검출 확률은 줄어들지만 오검출 확률이 증가하는 상충관계가 존재한다.

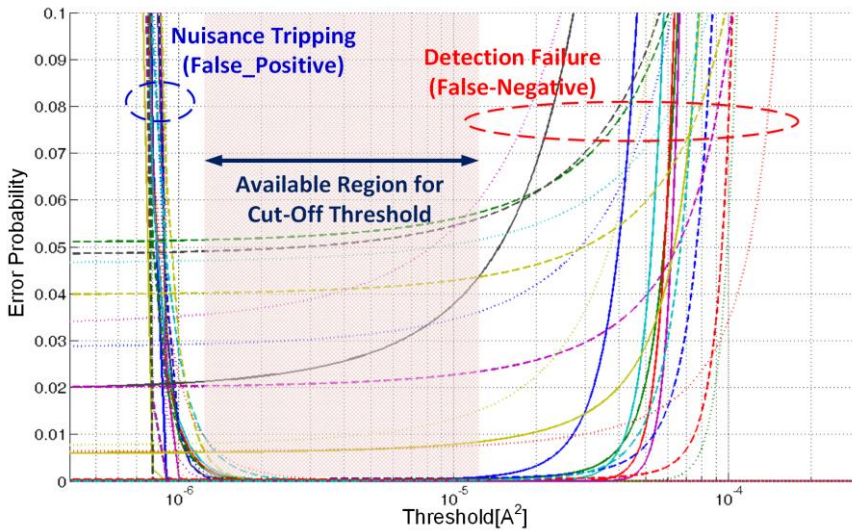


그림 3.13 실험 데이터를 기반으로 한 검출 임계치 설계.

아크사고 검출기의 미검출 확률을 0.06 이하로, 오검출 확률은 0.01 이하로 확보할 때 가능한 임계치의 영역은 그림 3.13과 같다. 그림 3.13에 보인 영역 안에서 아크사고 검출기의 측정오차를 감안하여 여유를 두고 임계치를 설정하면 제한된 영역 안에서 원하는 신뢰도를 가지는 아크사고 검출기를 설계할 수 있다. 그림 3.13에서 낮은 오검출 확률 확보는 비교적 쉬운것에 반해, 낮은 미검출 확률 확보는 상당히 어려움을 알 수 있다. 정상상태 데이터는 표준편차가 상대적으로 작아 조금만 임계치를 증가시켜도 낮은 미검출 확률을 확보하기 쉽다. 이에 반해 사고상태 신호는 표준편차가 상대적으로 크기 때문에 확률분포가 정상상태보다 넓게 분포되고 따라서 낮은 오검출 확률을 유지하면서 미검출 확률을 낮추는데 한계가 있다. 표 3.4는 임계치를  $10^{-5}$ 로 결정했을 경우 1회 동작에 대한 미검출 및 오검출 확률을 정리한다. 확률



표 3.4 임계치가  $10^5$ 일 때 1회 동작에 대한 미검출 및 오검출 확률.

조건	미검출 [ppm]	오검출 [ppm]
1.25 A/0.8 mm	558.095	0.000
1.25 A/1.6 mm	409.751	0.009
1.25 A/2.4 mm	0.136	0.019
1.25 A/3.2 mm	5.012	0.079
1.25 A/4.0 mm	0.002	0.000
2.5 A/0.8 mm	7,849.719	0.000
2.5 A/1.6 mm	37,735.991	67.482
2.5 A/2.4 mm	641.316	0.623
2.5 A/3.2 mm	55,980.680	0.020
2.5 A/4.0 mm	384.627	0.000
3.75 A/0.8 mm	166.393	0.835
3.75 A/1.6 mm	22,650.926	0.000
3.75 A/2.4 mm	42,891.041	0.000
3.75 A/3.2 mm	54,448.268	0.000
3.75 A/4.0 mm	34,492.002	0.000
5 A/0.8 mm	0.031	0.000
5 A/1.6 mm	7,388.672	15.563
5 A/2.4 mm	50,491.226	0.000
5 A/3.2 mm	53,956.318	0.000
5 A/4.0 mm	13,279.795	0.000

데이터는 작은 수치를 쉽게 비교할 수 있도록 백만 번의 검출기 동작 중 일어나는 오류의 횟수를 의미하는 백만분율(Parts per million)로 나타낸다.

만약 적용 시스템이 1회 동작으로 얻을 수 없는 높은 신뢰성을 요구한다면, 주어진 시간안에 여러 번의 검출기 동작을 하는 방법으로 검출 확률의 보완이 가능하다. 검출기의 오작동 확률은 검출이 요구되는 시간동안 수행되는 검출 동작의 횟수 및 방법에 따라 달라지므로 원하는 검출 성능을 얻을 수 있도록 검출 방법을 알맞게 설계해야 한다. 예를 들어 검출이 요구되는 시간동안 단 1회의 동작으로 사고를 검출한다면 오작동 확률은 표 3.4와 같지만, 보다 낮은 미검출 확률을 얻기 위해(높은 아크사고 검출 확률을 얻기 위해) 해당 시간동안 검출기 동작

표 3.5 검출기 3회 동작에 따른 미검출 및 오검출 확률.

조건	미검출 [ppm]	오검출 [ppm]
1.25 A/0.8 mm	0.000	0.000
1.25 A/1.6 mm	0.000	0.026
1.25 A/2.4 mm	0.000	0.057
1.25 A/3.2 mm	0.000	0.237
1.25 A/4.0 mm	0.000	0.000
2.5 A/0.8 mm	0.484	0.000
2.5 A/1.6 mm	53.736	202.434
2.5 A/2.4 mm	0.000	1.869
2.5 A/3.2 mm	175.434	0.061
2.5 A/4.0 mm	0.000	0.000
3.75 A/0.8 mm	0.000	2.506
3.75 A/1.6 mm	11.621	0.000
3.75 A/2.4 mm	78.904	0.001
3.75 A/3.2 mm	161.418	0.000
3.75 A/4.0 mm	41.035	0.001
5 A/0.8 mm	0.000	0.000
5 A/1.6 mm	0.403	46.688
5 A/2.4 mm	128.721	0.000
5 A/3.2 mm	157.082	0.000
5 A/4.0 mm	2.342	0.001

횟수를 3회로 증가 시키고 3개의 데이터 중 단 하나라도 임계치를 초과할 때 사고로 검출한다면 미검출 확률이 표 3.4에 나타난 수치의 3 제곱으로 줄어든다. 하지만 미검출과 오검출의 상충관계에 따라 오검출은 반대로 증가할 것이며, 이러한 상충관계에 따라 아크사고 검출기는 확보 가능한 검출 신뢰성의 한계를 갖는다. 검출 기준을 이와 같이 변경했을 때 검출 확률은 표 3.5와 같다. 검출기의 검출방법 변경으로 검출의 기회가 높아짐에 따라 모든 조건에서 미검출 확률이 약 175 ppm 이하로 대폭 개선되었으며, 반대로 오검출 확률은 대략 200 ppm 수준으로 증가한다. 이처럼 주어진 실험 데이터를 바탕으로 시스템 요구에 따라 검출방법을 알맞게 설계하여 요구되는 신뢰성을 만족하도록 아크사고 검출기를 설계할 수 있다.

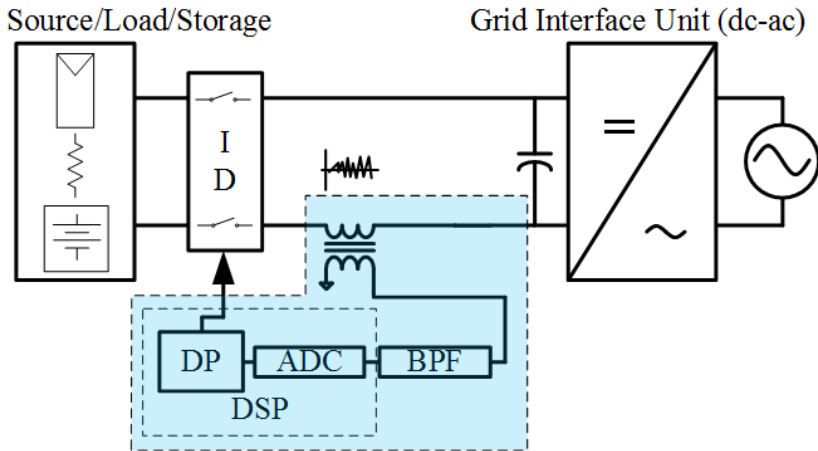


그림 3.14 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기의 개념도.

지금까지 신호의 산포가 크고 변수 간 일정한 상관관계를 가지지 않아 수학적으로 설명이 어려운 아크사고의 검출 방법을 도출하기 위해, 통계적 방법을 이용하여 실험 데이터로부터 검출기의 검출 성능을 보장할 수 있는 임계치 설계 및 검출방법에 대해 논의하였다. 통계기법을 이용해 도출된 아크사고 검출법은 노이즈가 적은 환경에서 검출 임계치에 따라 정해지는 오작동 확률로 신뢰성이 보장된다. 하지만 이러한 형태의 아크사고 검출기는 직류 마이크로그리드 환경에서 전력변환기가 발생시키는 노이즈의 영향을 받아 오작동을 일으킬 것이다. 따라서 3.2.4에서는 마이크로그리드 환경에서 전력변환기의 구동이 아크검출기 동작에 미치는 영향을 분석하고 이에 대한 해결책을 제시한다.

### 3.2.4 전력변환기가 검출기 동작에 미치는 영향 및 해결방법

본격적인 논의에 앞서, 아크사고 검출기의 구동원리에 대한 논의를 통해 검출기의 구현에 대한 이해를 돕는다. 그림 3.14는 앞선 논의를

기반으로 한 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기의 개념도이다. 계통 연계 유닛(Grid Interface Unit, GIU)은 직류 마이크로그리드의 계통 연계를 담당하며 배선 전압을 일정하게 유지한다. 직류 배선에는 전원, 부하, 저장장치가 연계된다. 그림 3.14는 개념 이해를 돕기 위해 단일 분기를 가정하여 시스템을 단순화하였으며, 실제로는 다양한 구성요소들이 직류 배선을 통해 연계될 것이다 [3, 87]. 아크사고 검출기는 전류 센서로부터 대역 통과 필터(Band Pass Filter, BPF)와 같은 아날로그 회로를 거쳐 아크사고 검출에 필요한 분기 전류 정보를 취득한다. 2장에서 논의하였듯 사용환경에 따라 검출에 적합한 주파수 대역은 달라질 수 있다. 취득된 신호는 DSP(Digital Signal Processor)와 같은 연산기를 이용하여 데이터 프로세싱(Data Processing, DP)하여 아크사고의 발생 여부를 판단한다. 아크사고 검출기는 아크를 검출하여 차단 스위치(Interrupting Device, ID)를 통해 담당 분기를 보호한다.

직류 마이크로그리드는 상용전원, 신재생 에너지 및 저장장치를 비롯한 분산전원, 전기기기 부하와 같은 다양한 구성요소가 직류 배선에 연계되어 운용된다. 대부분의 구성요소들은 배선이 제공하는 직류 배선 전압과 다른 타입/레벨의 전력을 생산 및 소비할 뿐만 아니라 이를 위한 제어를 필요로 하므로 통상적으로 그림 3.15와 같이 전력변환기를 통해 연계된다. 그림에서 직류 마이크로그리드 구성요소를 연계하는 전력변환기는 계통 연계 유닛, 신재생에너지 연계 유닛(Renewable Interface Unit, RIU), 저장장치 연계 유닛(Storage Interface Unit, SIU)으로 나타내었으며, 같은 맥락에서 부하를 구동하는 전력변환기는 부하 연계 유닛(Load Interface Unit, LIU)으로 나타낸다. 연계용 전력변환기는 높은 전류/전압 제어 성능과 높은 전력밀도를 가지기 위해

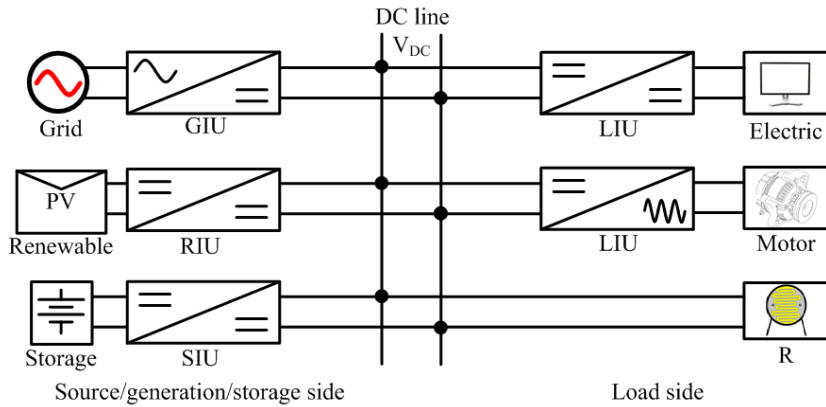


그림 3.15 직류 마이크로그리드의 개념도.

반도체 스위치를 이용하여 대부분 수 kHz에서 수십 kHz, 높게는 수백 kHz 이상의 주파수에서 구동하므로 직류 배선에 상당량의 노이즈를 인가한다. 전력변환기의 스위칭 노이즈는 주파수 정보를 기반을 둔 아크사고 검출기의 오작동 유발 요인으로 작용한다. 따라서 직류 마이크로그리드의 아크사고 검출은 태양광 시스템과 같은 단순한 형태의 직류 아크사고 검출기 구현에 비해 상당한 기술적 어려움을 가진다 [29, 35].

전력원, 부하, 저장장치를 연계하는 전력변환기는 배선에 일정 이하의 노이즈를 인가하지 않도록 규제한다. 따라서 대부분의 전력 변환 회로는 노이즈 저감을 위해 입력단에 필터를 사용한다. 하지만, 큰 크기의 필터는 비용을 증가시킬 뿐만 아니라 초기 시스템 연결, 사고에 의한 전원 차단 및 복전 시 큰 돌입전류(Inrush current)를 발생시키게 되므로 규정에 부합하는 최적의 필터를 설계하는 것이 바람직하다 [88, 89]. 따라서 전력 변환 회로에서 발생하는 노이즈는 완전히 감쇠되지 않아 일정량은

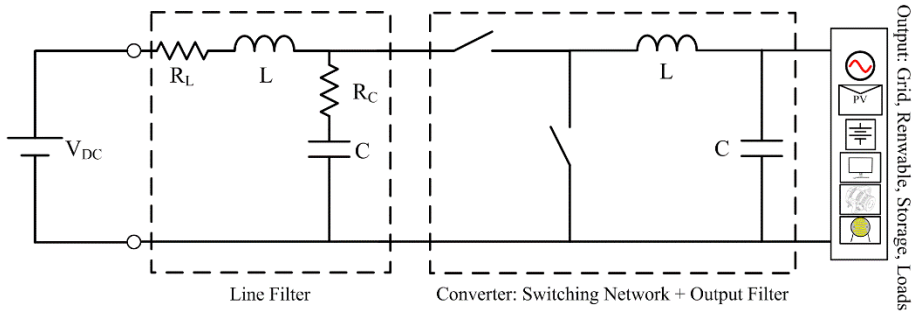


그림 3.16 일반적인 전력 변환 회로의 개념적 구조.

배선에 인가되며 이는 아크사고 검출기의 동작에 영향을 미칠 가능성이 있다. 이에 따라 본 연구는 직류 마이크로그리드 시스템의 구성요소인 전력변환기와 아크사고 모델을 통해 전력변환기의 동작이 아크사고 검출기의 검출 성능에 미치는 영향에 대해서 분석한다.

#### 3.2.4.1 직류 마이크로그리드 전력변환기 모델링

일반적으로 전력 변환 회로들은 그림 3.16과 같이 구성된다. 전력 변환 회로는 스위치를 구동하여 전압의 승압 또는 강압을 가능하게 하고 피드백을 통해 부하 또는 전원의 정상적인 구동을 보장한다. 전력변환기는 PWM(Pulse Width Modulation)을 통해 제어하는 것이 일반적이며, 용량 및 토폴로지에 따라 일정한 주파수로 구동된다 [90]. 스위칭 네트워크는 스위칭 주파수에 해당하는 노이즈를 배전선으로 인가하며, 입력 필터는 생성된 노이즈를 감쇠한다.

스위칭 네트워크에서 발생하는 노이즈는 입력 필터에 의해 감쇠되지만 일정량은 통과되어 배전선에 인가된다 [91]. 따라서 전력변환기의 스위칭 노이즈는 전로의 전류를 감시하여 아크사고를 검출하는 아크사고

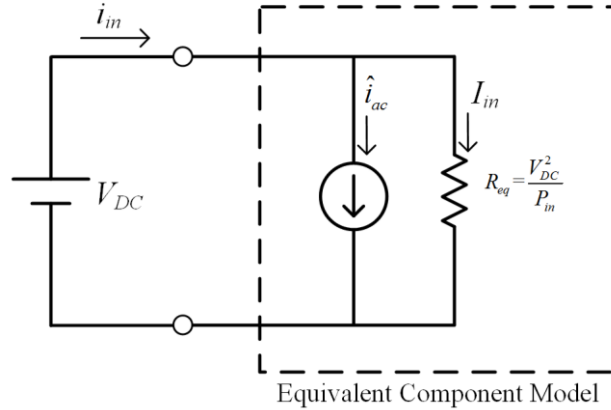


그림 3.17 스위칭 특성을 고려한 전력 변환 회로의 AC 등가회로.

검출기의 검출 성능에 영향을 미칠 것이다. 이러한 현상을 좀더 논의하기 위해, 전력 변환 회로를 아크사고 검출기가 관측하는 입력 측에서 바라볼 때의 등가회로로 그림 3.17과 같이 나타낸다. 그림 3.17에서  $i_{in}$  은 전력변환기의 입력 전류,  $\hat{i}_{ac}$  는 전력변환기의 입력전류의 AC 성분,  $I_{in}$  은 전력변환기 입력 전류의 DC 성분이며,  $R_{eq}$  는 전력변환기의 부하 등가 저항,  $P_{in}$  은 입력 전력이다. 전력변환기의 내부는 스위칭 네트워크를 이용하여 전류를 제어함에 따라 사인파형이 아닌 스위치의 온/오프(On/Off)마다 전류가 구형파(Square wave) 형태를 띠게 되어 스위칭 주파수의 고조파가 발생한다. 따라서 전력변환기의 입력전류는 (3.1)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{in} = I_{in} + \hat{i}_{ac} = I_{in} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \cdot 2\pi \cdot f_s \cdot t + b_n \sin n \cdot 2\pi \cdot f_s \cdot t) \quad (3.1)$$

전력변환기 전류의 AC 성분은 스위칭 네트워크의 수에 따라 복수로 나타날 수 있으며, 입력 필터에 의한 감쇠 정도에 따라 계수  $a_n$ ,  $b_n$  은

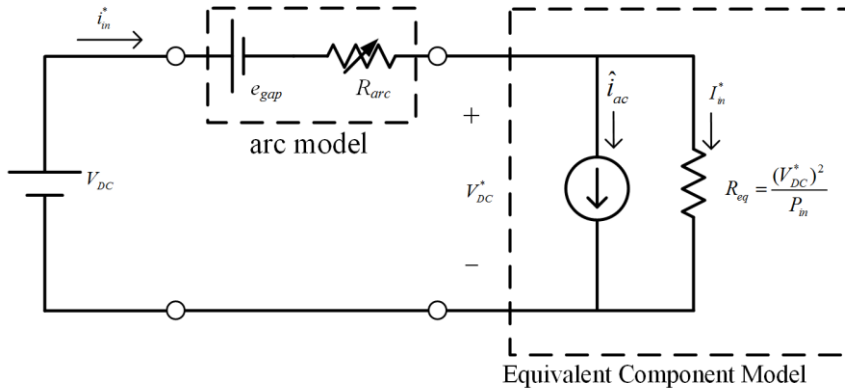


그림 3.18 배전선에서 일어나는 아크와 전력변환기의 등가모델.

다른 값을 가진다. 전력변환기가 인가하는 전류의 AC 성분 중 입력 필터에 의해 감쇠된 기본파만 입력 측으로 나타나고 그 외 모든 고조파 성분은 완전히 차단 되어 입력측에 나타나지 않는다고 가정하면(1고조파 근사, First Harmonic Approximation, FHA) 입력전류는 (3.2)와 같이 다시 표현 될 수 있으며, 결과적으로 전류성분의 전력 스펙트럼 밀도에서 스위칭 주파수 성분만 압도적으로 크게 나타나게 될 것이다 [91].

$$\hat{i}_{ac} \approx a_1 \cos 2\pi \cdot f_s \cdot t + b_1 \sin 2\pi \cdot f_s \cdot t \quad (3.2)$$

### 3.2.4.2 아크사고의 AC 특성 모델링

아크사고의 발생에 따라 전력변환기와 검출기 사이의 전로에 아크 임피던스가 삽입되고 이에 따라 입력전류의 변형이 일어난다. 아크로 인해 변형되는 입력 전류의 AC 성분은 그림 3.18과 같이 나타낼 수 있으며, 아크사고 발생에 의한 배전 전류는 (3.3)과 같다. (3.3)에서  $i_m^*$ 은



아크사고 발생 후의 입력 전류이며,  $I_{in}^*$  은 입력전류의 DC 성분  
아크사고로 인해 나타나는 노이즈를 포함한 입력 전류이다.

$$i_{in}^* = \hat{i}_{ac} + I_{in}^* \quad (3.3)$$

전력변환기의 입력에는 아크사고에 의해 아크 전압의 평균만큼 낮아진  
배선 전압에 아크사고가 발생시키는 노이즈가 실린 형태의 입력 전압이  
보일 것이다. 하지만 많은 전력변환기의 경우 입력전압이 변동할  
경우에도 부하의 제어에 문제가 없도록 피드백 제어를 통해 낮은 Audio-  
Susceptibility를 가진다 [92]. 또한, 전력변환기의 입력 필터는 아크로  
인한 고주파 노이즈를 감쇠하여 실제로 전력변환기의 스위칭 네트워크에  
인가 되는 전압은 노이즈가 감쇠된 형태가 된다. 따라서 아크사고 발생  
후에도 후방의 전력변환기는 입력 필터 및 제어기의 낮은 Audio-  
Susceptibility에 의해 정상적으로 제어 된다고 고려할 수 있다. 따라서  
전력변환기는 아크 발생 후에도 발생 전과 비슷한 형태의 AC 전류를  
직류 배선에 인가할 것이다.

결과적으로 아크 발생 후 직류 배선에는 전력변환기의 AC 전류에  
아크로 인한 AC 전류가 중첩(Superposition)되어 나타난다 [17]. 본  
논문에서는 이러한 신호의 중첩 현상이 아크사고 검출에 미치는 영향을  
살펴보기 위해 아크사고의 AC 특성을 모델링 한다. 앞서 2장에서  
논의했던 아크 모델은 아크의 DC 특성만을 표현하므로 AC 분석에는  
적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 아크의 AC 전류 특성을 그림  
3.19에 나타낸 Uriarte의 아크 모델을 이용하여 모델링한다 [60].  
Uriarte의 아크 모델은 그림 3.19에 나타낸 것처럼 가변 전압원  $e_{gap}$  과  
가변 저항  $R_{gap}$  으로 아크사고를 모델하며, 아크 모델을 적용한

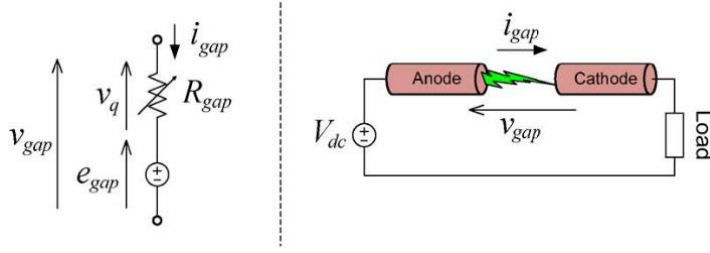


그림 3.19 아크의 AC 전류 특성을 고려한 Uriarte의 아크 모델 [60].

등가회로는 그림 3.18과 같다. Uriarte의 아크 모델에서 아크의 가변 저항과 가변 전압원은 각각 (3.4) 및 (3.5)와 같다.

$$R_{gap} \approx \frac{V_{DC}}{I_{in}} e^{2\alpha(q-1)} \quad (3.4)$$

$$e_{gap} = 0.5 \cdot (a + b \cdot x_{gap}) \cdot (\tanh(\lambda \cdot q) - \tanh(\lambda \cdot (q-1))) \quad (3.5)$$

따라서 위 수식을 통해 아크사고 후의 전류  $I_{in}^*$ 을 (3.6)과 같이 구할 수 있다.

$$I_{in}^* = \frac{V_{DC} - e_{gap}}{R_{gap} + R_{eq}} \approx \frac{V_{DC} - e_{gap}}{\frac{V_{DC}}{I_{in}} (1 + e^{2\alpha \cdot (q-1)})} = \frac{1}{(1 + e^{2\alpha \cdot (q-1)})} \left( I_{in} - \frac{e_{gap} \cdot I_{in}}{V_{DC}} \right) \quad (3.6)$$

### 3.2.4.3 전력변환기가 아크사고 검출에 미치는 영향

3.2.4.3은 앞서 도출된 전력변환기 모델과 아크 모델을 이용하여 간단한 형태의 분기를 모델하고, 분기 전류의 AC 특성을 고속 푸리에 변환을 통해 분석하여 전력변환기가 아크사고 검출에 미치는 영향을 분석한다.

먼저 전력변환기 모델의 적합성 확인을 위해 직류 마이크로그리드에

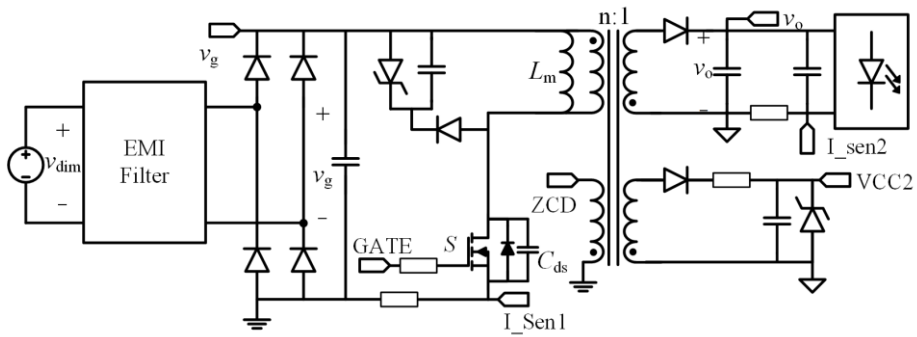


그림 3.20 DC용 24 W LED 램프 구동 회로의 개념도.

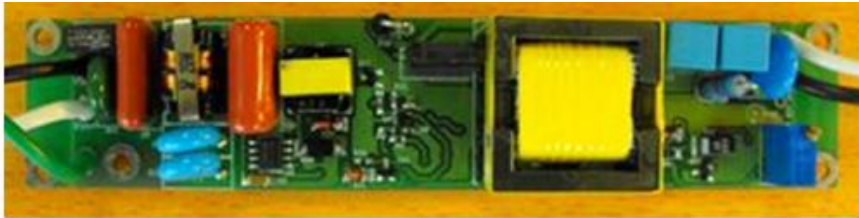


그림 3.21 모델링 검증에 사용된 24 W LED 구동회로.

사용 가능성이 큰 직류 부하인 발광 다이오드(Light Emitting Diode, LED) 램프 구동회로를 모델하고, 회로의 입력전류 특성을 모의실험 및 실험결과를 통해 검증한다. 그림 3.20은 전력변환기의 AC 전류 특성 검증을 위해 사용한 LED 램프 구동 회로의 개념도이다. 구동회로는 24 W LED 램프(48 V/0.5 A)를 구동하는 플라이백 타입의 회로이며 실험에서 얻어진 입력전류 파형과 PSIM을 이용한 모의실험 결과를 비교하여 모델의 적합성을 판단한다. 또한, 입력 필터로 인한 고조파 성분 감쇠를 고려하여, 1고조파 근사 해석을 통해 입력전류에 기본파만 존재한다고 가정하여 해석한 결과값 또한 함께 비교한다. 그림 3.21은

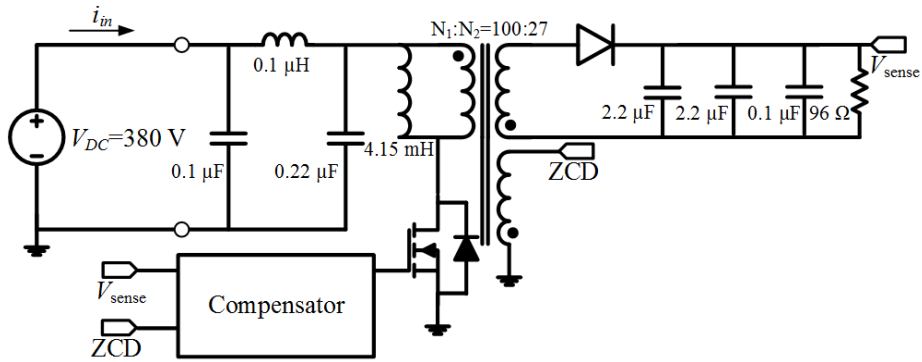


그림 3.22 PSIM 모의실험에 사용된 직류 LED 램프용 플라이백 회로.

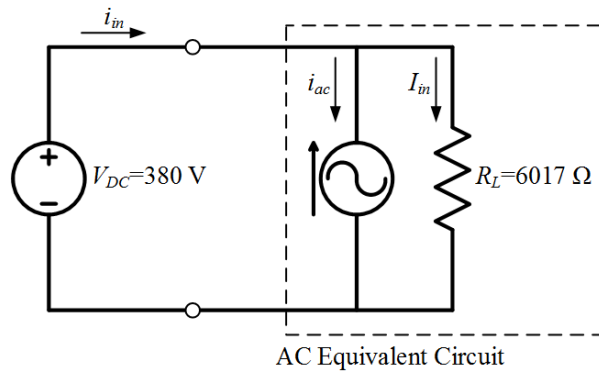


그림 3.23 1차 고조파 근사를 적용하여 단순화한 LED 드라이버 회로.

검증에 사용된 직류용 LED 램프 드라이버이며, 그림 3.22는 PSIM에 사용된 모의실험 회로이다. 모의실험에서 EMI필터는 LC필터로 단순화하였다. 그림 3.23은 LED 드라이버의 입력전류에서 스위칭 주파수 성분만을 고려하여 입력 전류를 DC 성분과 사인 파형으로 나타낸 PSIM 모의실험 회로를 나타낸다.

그림 3.24는 구동회로 전체에 대한 모의실험, 1차 기본파 근사를 가정한 모의실험, 구동 회로의 실제 실험으로부터 얻어진 입력 전류의

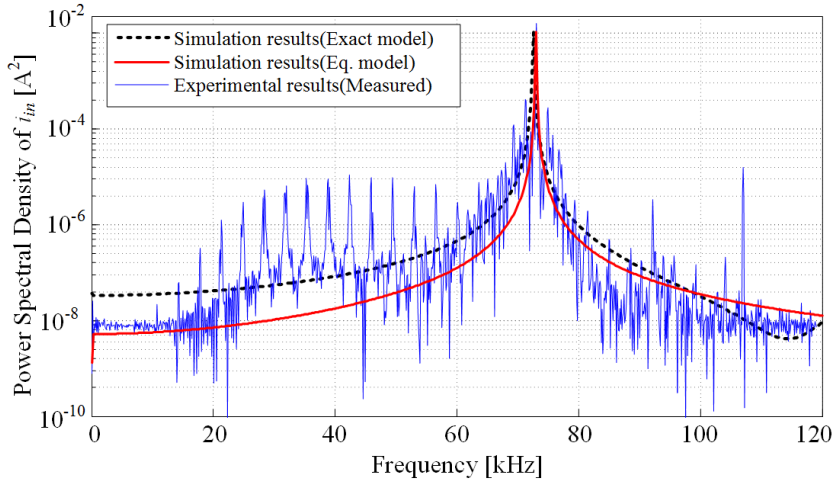


그림 3.24 LED 드라이버의 모의실험 및 실험결과의 FFT 비교.

고속 푸리에 변환 결과를 비교한다. 그림에 보인 것처럼 기본파를 제외한 주파수 대역의 성분은 없다고 가정한 모의실험 결과(적색 실선)는 순수한 사인 함수만으로 구성된 모의실험 결과(검은 점선)와 회로전체 모의실험 결과(파란 실선)에 비해 전체적인 스펙트럼 수치는 낮지만 약 73 kHz에 위치한 기본파 주파수 성분 대역의 특성을 잘 표현하고 있다. 또한, 실제 실험결과는 주변 환경의 노이즈에 영향을 받아 기본파 주파수 이외에도 일정량의 노이즈 성분이 관측되지만 모의실험의 결과와 일치하는 기본파 특성을 보여 모델링이 적합하다고 판단된다.

위에 보인 것처럼 전력변환기는 스위칭 주파수 대역에 강한 주파수 성분을 분기에 인가하므로 분기 전류의 AC 성분을 감지하여 사고를 검출하는 아크사고 검출기의 검출 성능에 영향을 미칠 것이다. 특히, 전력변환기의 스위칭 주파수가 아크사고 검출기가 관찰하는 주파수 대역에 포함된다면 사고상태가 아닌 정상상태에서 해당 아크사고

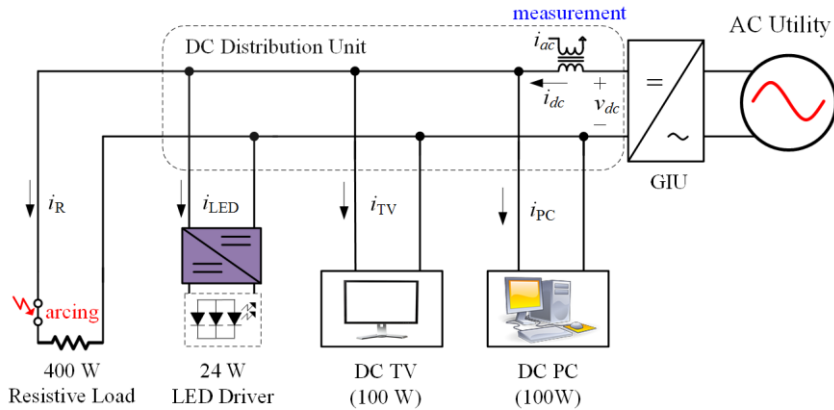


그림 3.25 직류 마이크로그리드의 아크 발생 모의실험.

검출기는 오작동을 일으킬 확률이 높다.

전력변환기의 구동이 아크사고 검출기에 미치는 영향을 확인하기 위하여 그림 3.25와 같은 구성으로 모의실험과 실험을 진행하였다. 아크사고의 모델은 앞서 언급한 Uriarte의 모델을 사용한다. 마이크로그리드 모의를 위하여 2장에서 꾸민 실험세트의 직류 링크에 LED 램프 드라이버(24 W), DC TV(100 W), DC PC(100 W), 저항부하(400 W)를 연결하였고 4개의 부하가 한 분기에 연결되어 있어 그림과 같이 아크사고 검출기는 사고 검출을 위해 분기로 흐르는 전류의 총 합인  $i_{dc}$ 의 AC 성분  $i_{ac}$ 를 감시한다. 배선 전압은 6.6 kW 용량의 양방향 계통 연계 유닛을 이용하여 380 V로 제어하도록 하였다. 아크사고는 400 W 저항부하에서 발생하며 아크사고 검출기의 관측점에는 아크의 주파수 성분 및 각종 직류 부하의 주파수 성분이 중첩되어 나타날 것이다. 모의실험은 주어진 조건에서 아크사고가 발생하지 않을 때와 발생할 때의 조건에서 PSIM을 이용하여 시스템을 구성하고 모의실험에서 얻는 분기 전류를 고속 푸리에 변환하여 분석한다.

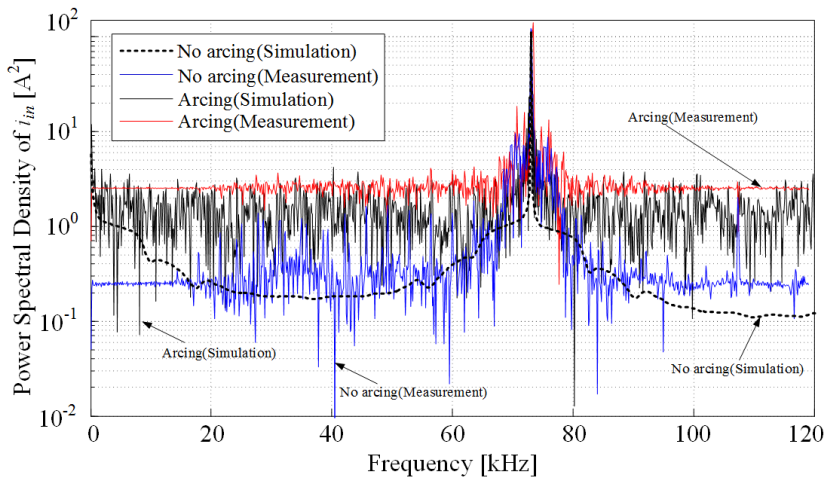


그림 3.26 직류 마이크로그리드 아크사고 모의실험 결과.

모의실험 및 실험 결과는 그림 3.26과 같다. 그림은 정상상태, 400 W 저항부하의 직류 배선에 아크사고가 발생할 때에 대한 모의실험, 그리고 각각에 대한 실제 실험 결과를 고속 푸리에 변환을 통해 비교한다. 먼저 정상상태에서, 앞서 논의했던 것처럼 LED 드라이버에서 나타나는 주파수 특성이 모의실험과 실제실험에서 동일하게 나타나는 것을 알 수 있다. DC PC와 DC TV의 주파수 특성은 나타나지 않는데 이는 두 부하의 입력에 입력 필터가 상당히 크게 설치되어 있기 때문이다. 이는 교류용 부하를 직류로 변경하면서 제거하지 않은 입력 필터로 인한 것이다. 아크사고 검출 및 평상시에 운영 조건에서는 문제가 발생하지 않지만, 실제 직류 마이크로그리드 운영에서 큰 필터는 시스템의 동특성에 악영향을 끼치고 사고전류에 기여함으로써 사고 차단 및 복구에 부정적인 영향을 끼치기 때문에 부하의 중요도나 구동 특성에 적합한 필터를 설치하는 것이 바람직하며, 이 경우 검출기의 작동에 영향을 줄 것이다 [4].

또한, 그림 3.26은 사고상태에서 검출기의 관측 배선에 나타나는 주파수 스펙트럼을 보인다. 아크사고가 발생함에 따라 넓은 대역에 걸쳐 주파수 성분이 증가하며 이러한 특성을 이용하여 아크사고 검출기는 아크의 발생 여부를 판단할 것이다. 예상대로 입력 전류에는 전력변환기가 생성하는 주파수 성분과 아크사고 발생에 따른 주파수 성분이 중첩되어 나타난다. 특히 실험 데이터에서 LED 램프 안정기가 방출하는 노이즈 성분은 스위칭 주파수 부근에서 아크사고에 의한 스펙트럼보다 더 커서 아크사고 검출기의 사고 검출 판단을 혼란스럽게 할 것이다. 만약 아크사고 검출기가 전력변환기의 스위칭 주파수에 해당하는 대역의 전력 스펙트럼 밀도 크기에 따라 사고를 검출한다면, 검출기는 전력변환기가 동작하지 않아 노이즈가 없을 때는 아크사고를 정상적으로 검출할 수 있지만, 전력변환기가 동작할 경우 전력변환기 노이즈로 인해 오검출이 증가할 것이다. 이러한 오작동을 억제하기 위해 검출 민감도를 낮췄을 경우에는 반대로 미검출이 일어날 수 있으므로 이러한 방법은 현실적인 해결책이 될 수 없다. 또한 관찰 주파수 대역을 변경하여 노이즈의 영향을 피하는 방법은 임의의 주파수 대역에서 구동되는 전력변환기가 연결될 수 있는 직류 마이크로그리드 환경에서 근본적인 해결책이 될 수 없다. 결론적으로, 전력변환기는 아크사고 검출 동작에 상당한 영향을 끼치며 이에 대한 해결책이 필요하다.

#### **3.2.4.4 전력변환기로 인한 오작동 억제**

앞에서 살펴 보았듯 전력변환기의 구동은 배선의 주파수 스펙트럼에 영향을 주므로 전류의 주파수 특성에 기반을 둔 아크사고 검출기의 검출성능에 상당한 영향을 미칠 가능성이 크다. 따라서 직류



마이크로그리드용 아크사고 검출기는 전력변환기로 인한 오작동을 효과적으로 억제하여 노이즈가 존재하는 환경에서도 검출 정확도를 유지할 수 있어야 한다. 이를 위해 3.2.4.4는 창 함수를 이용한 전력변환기 노이즈 저감 방법에 대해 논의한다.

전력 시스템에서 전력변환기의 주파수 특성은 표준에 의거하여 배전 전압의 제어 범위, 전류의 맥동이 규제되기 때문에 일정치 이하로 유지된다 [93]. 또한, 시스템 구성요소들은 배선에 일정량 이상의 노이즈를 인가하지 않기 위해 입력 필터를 내장하게 된다. 하지만 필요 이상의 필터는 시스템의 물리적 크기를 증가시킬 뿐만 아니라 사고전류를 증가시켜 차단을 어렵게 하는 등의 단점을 가지므로 전력변환기는 표준에 부합하는 최소의 입력 필터를 사용하게 된다. 따라서 전력변환기가 발생시키는 일정량의 노이즈는 직류 배선에 인가된다. 전력변환기의 입력 전류는 입력 필터에 의해 감쇠된 스위칭 네트워크에서 방출하는 스위칭 주파수 성분이 주가 되는 신호이다.

그림 3.27은 아크사고의 발생 여부에 따른 전류의 전력 스펙트럼 밀도이다. 각각의 데이터는 2장에서 획득한 데이터의 일부로 5 A 조건에서 아크사고 발생 직전의 데이터와 0.8 mm 전극간격을 가지는 아크를 발생시킨 파형에서 추출한 사고상태 데이터를 고속 푸리에 변환한 결과이다. 데이터는 가독성을 위해 8,192개의 주파수 데이터를 32:1로 축소 평균화하여 나타내었다 [72]. 그림에서 정상상태 데이터와 사고상태 데이터 모두 전력변환기의 스위칭 주파수 성분을 포함한다. 본 논문에서는 전류로부터 전력변환기의 주파수 특성 추출을 원활하게 하기 위해 창 함수를 이용한다.

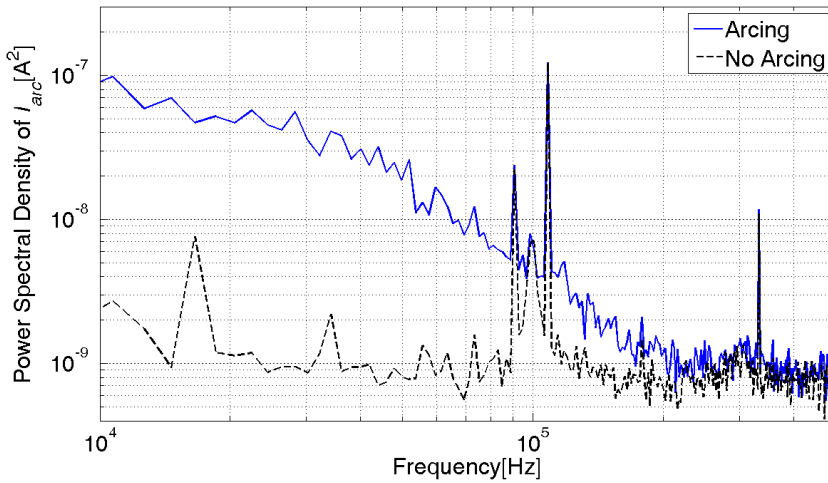


그림 3.27 아크사고 발생에 따른 전류의 전력 스펙트럼 밀도.

이산 푸리에 변환은 주파수 해상도가 충분히 높지 않아 신호에 포함된 주파수 성분이 기저함수의 배수가 아닐 때 변환된 주파수 스펙트럼 상에 꼬리(Tail)가 나타나는 특성이 있다. 창 함수는 이산 푸리에 변환으로부터 나타나는 꼬리를 억제하여 데이터 가독성을 높인다 [72]. 결과적으로 이산 푸리에 변환할 데이터와 같은 길이를 가지는 창 함수를 곱하여 푸리에 변환하면 주파수 가독성이 향상된 데이터를 얻을 수 있다.

그림 3.28은 대표적인 창 함수 중 하나인 Hamming 창 함수이다. Hamming 창 함수의 수식은 (3.7)과 같다.

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (3.7)$$

창 함수는 주엽(Main lobe)의 폭과 부엽(Side lobe)의 감쇠 정도 간에 상충관계(Trade-off)를 가진다. 따라서 주엽이 좁아서 집중도가 좋은 창 함수는 부엽의 크기가 상대적으로 커서 꼬리가 상대적으로 많이 나타난다.

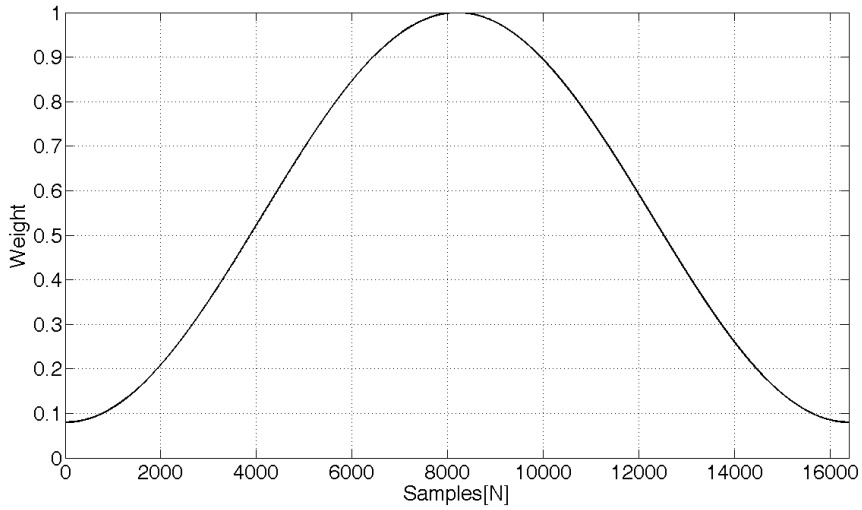


그림 3.28 Hamming 창 함수.

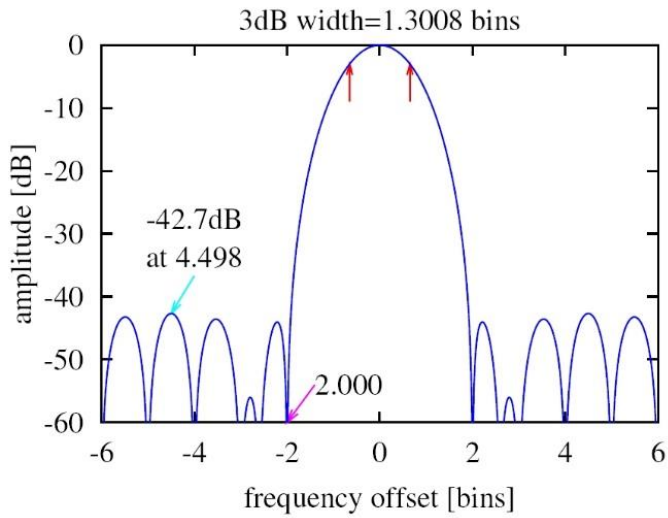


그림 3.29 Hamming 창 함수의 주파수 응답 [95].

Hamming 창 함수는 넓지 않은 주엽과  $-40$  dB 정도로 충분한 부엽의 감쇠를 가져 주파수 스펙트럼의 해상도 확보가 용이하므로 널리 사용된다 [94, 95]. 따라서 본 연구에서는 Hamming 창 함수를 이용하여 분석을

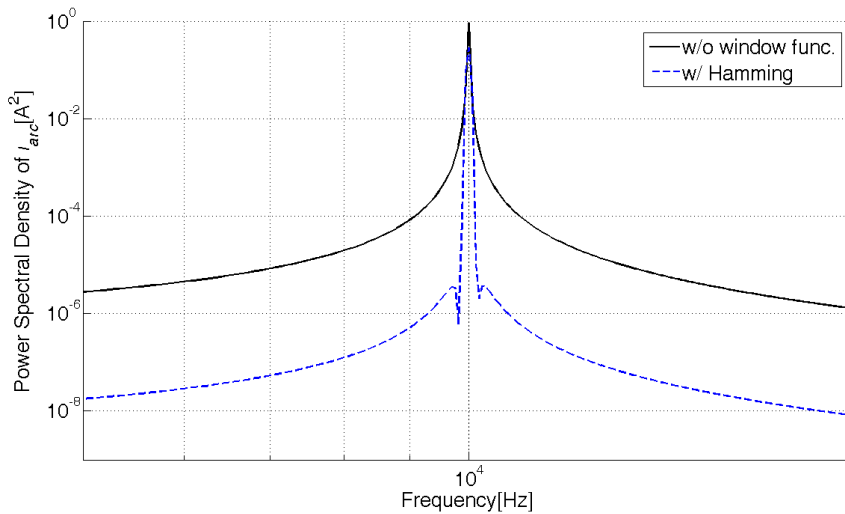


그림 3.30 Hamming 창 함수 적용 후 10 kHz 사인함수의 주파수 특성.

계속하며 그림 3.29는 Hamming 창 함수의 주파수 응답 특성을 나타낸다 [95].

그림 3.30은 10 kHz 주파수를 가지는 사인함수의 고속 푸리에 변환 결과이다. 결과는 창 함수의 적용 유무에 따른 데이터의 가독성 차이를 명확하게 보여 창 함수의 효용성을 검증한다. 결과는 MATLAB을 이용하여 이상적인 사인함수를 1 MS/s의 샘플링 주파수로 16,384개의 샘플을 취하고 고속 푸리에 변환하여 0~500 kHz 대역의 주파수 스펙트럼을 8,192개의 주파수 데이터로 분석한다. 결과로 얻어진 주파수 스펙트럼은 높은 샘플링 주파수와 많은 양의 데이터로 넓은 대역에 걸쳐 수치적으로 상당히 촘촘한 주파수 해상도를 가지지만 창 함수를 쓰지 않은 데이터는 60 Hz의 배수가 되는 주파수로는 10 kHz를 정확히 표현할 수 없어 그림과 같이 넓은 꼬리가 생긴다. 반면 Hamming 창

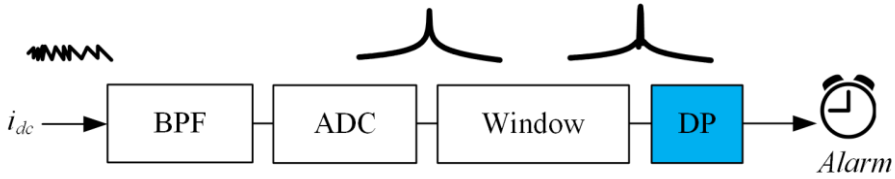


그림 3.31 아크사고 검출 과정.

함수를 적용한 데이터를 고속 푸리에 변환한 결과는 신호의 집중도가 상당히 높고 꼬리가 작아서 데이터 가독성이 상당히 개선되었다.

전력변환기의 스위칭 주파수 성분 또한 이산 푸리에 변환의 특성에 따라 꼬리가 나타날 것이다. 주파수 스펙트럼에서 꼬리 성분은 실제 신호가 가진 크기보다 크게 나타나기 때문에 검출기가 스위칭 주파수 성분을 인식하는데 어려움으로 작용할 수 있다. 따라서 본 논문은 아크사고 검출을 위해 취득하는 전류 데이터에 Hamming 창 함수를 적용하여 데이터 가독성이 향상되도록 한 후, 다음에서 논의되는 노이즈 억제 방법이 효과적으로 적용될 수 있도록 한다.

### 3.2.5 노이즈에 강인한 아크사고 검출 방법

3.2.5는 앞서 창 함수를 통해 가독성을 높인 전력 스펙트럼 밀도 데이터로부터 전력변환기 노이즈에 강인한 아크사고 검출을 어떻게 구현할 수 있는지 논의한다.

그림 3.31은 개념적인 아크사고 검출 과정을 설명한다. 대역 통과 필터는 분기 전류의 AC 성분 중 모니터링 할 주파수 대역만 통과시키며, 필터를 통과한 데이터는 충분한 샘플링 속도를 가지는 아날로그-디지털 컨버터(Analog-to-Digital Converter, ADC) 모듈을 통해 DSP로

전달된다. DSP는 데이터의 Offset을 제거한 뒤 창 함수를 사용하여 가독성을 향상시키고, 이 데이터를 바탕으로 아크사고의 발생 여부를 판단한다. 데이터 프로세싱(DP) 단계에서는 아크의 발생 여부를 판단할 수 있도록 고속 푸리에 변환을 통해 주파수 스펙트럼 데이터를 얻은 후, 전력변환기의 스위칭 노이즈를 제거함으로써 검출 오작동을 억제한다.

본 논문은 그림 3.32와같은 새로운 형태의 아크사고 검출 방법을 제안한다. 제안된 아크사고 검출 방법은 전력변환기 스위칭 노이즈 및 기타 오작동 요인으로부터 강인하게 동작하기 위하여 두 단계의 데이터 프로세싱을 사용한다. 첫 번째 단계는 전력변환기로부터 발생하는 스위칭 노이즈를 저감하여 오작동을 억제하며(Switching noise reduction), 두 번째 단계는 데이터를 평균화(Data averaging)하여 부하 급변과 같은 순간적인 노이즈에 강인한 검출이 가능하도록 한다. 그림에서  $D_{psd}$  는 고속 푸리에 변환으로 얻어진 전력 스펙트럼 밀도를 말하며,  $N$  은  $D_{psd}$  에 포함된 데이터의 길이를 의미한다.  $D_{psd}$  는 아크사고 검출에 사용할 주파수 대역의 데이터만을 포함한다.  $D_{mean}$  은 주파수 스펙트럼 데이터의 평균값을 저장한다. 또한,  $D_{max}$  와  $m$  은 각각  $D_{psd}$  의 최대값과 최대값을 가지는 데이터의 위치를 저장한다. 스위칭 노이즈 저감을 위해 프로세서는 조건 (3.8)에 따라  $D_{psd}$  에 제거해야 할 성분이 있는지 판단한다.

$$D_{max} > k_1 \cdot D_{mean} \quad (3.8)$$

(3.8)의  $k_1$  은 스펙트럼 평균값  $D_{mean}$  에 곱하는 이득으로 차단할 스위칭 성분의 기저대역 대비 상대 크기를 결정한다. 따라서 조건식의 참, 거짓을 결정하는 상수  $k_1$  의 크기에 따라 노이즈 억제 정도가 달라진다. 작은

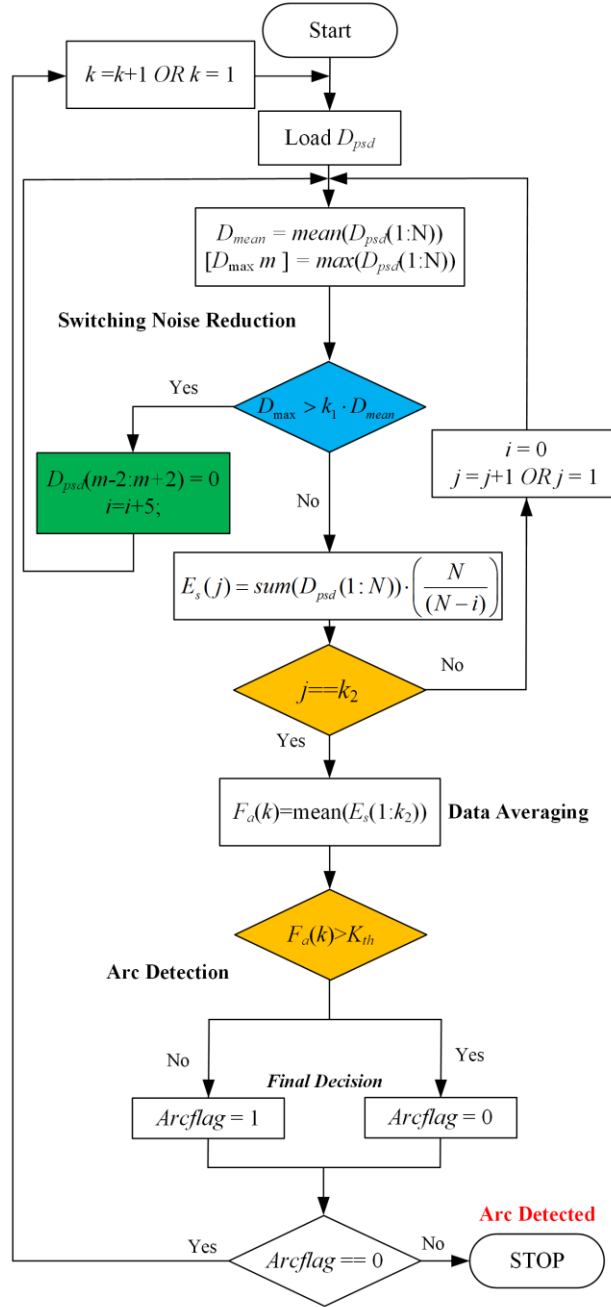


그림 3.32 제안된 아크사고 검출 방법.

값의  $k_1$  은 프로세싱 데이터 수를 증가시켜 노이즈 억제력을 높이지만, 과도한 프로세싱은 미검출을 발생시킬 수 있다. 반면 큰 값의  $k_1$  은

프로세싱 데이터 수를 줄여 실제 측정값에 가까운 스펙트럼을 얻지만 전력변환기 노이즈 억제 성능을 감소시켜 오검출을 유발하므로 알맞은 값을 정해야 한다. 검출기 설계 파라미터 결정에 대한 논의는 4장에서 다룬다.

데이터가 조건 (3.8)을 만족하면 제안된 알고리즘은 데이터에 제거해야 할 전력변환기 노이즈가 포함된 것으로 판단하고 대역 내에서 최대값을 가지는 주파수 데이터를 0으로 대체한다. 여기서 스위칭 주파수의 앞 뒤 데이터를 함께 0으로 대체하는데 이는 Hamming 창 함수의 주파수 특성을 고려하기 위함이다. 그림 3.29에서 알 수 있듯 Hamming 창 함수는 주엽의 대역폭이 고속 푸리에 변환의 이산 주파수 단위로 약 1.3으로 정수인 2를 적용하여 최대값을 가지는 주파수를 중심으로 앞뒤 2개의 데이터, 총 5개의 데이터를 0으로 치환한다. Hamming 창 함수의 부엽은 -40 dB 이상의 충분한 감쇠를 가지기 때문에 한번 처리된 데이터에 대해서는 추가적인 데이터 프로세싱을 하지 않으며, 순서도에 나타난 것처럼 (3.8)이 만족하지 않을 때까지 반복적으로 데이터를 처리하여 데이터에 중첩된 전력변환기 노이즈 성분을 충분히 제거한 후 다음 단계로 넘어 간다. 노이즈 저감 프로세싱은 데이터를 처리하면서 0으로 치환한 데이터의 수를 카운터(Counter)  $i$ 에 저장한다.

다음 단계에서는 스펙트럼 데이터의 총합을 (3.9)와 같이 구하여 검출 임계치와 비교할 수 있는 하나의 값으로 변환한다.

$$E_s(j) = \text{sum}(D_{psd}(1:N)) \cdot \left( \frac{N}{N-i} \right) \quad (3.9)$$

(3.9) 좌변에 곱하는 이득은 노이즈 저감 프로세싱에서 일부 데이터를



0으로 치환한 것에 대한 보상이다.

제안된 아크사고 검출 방법은 임계치와 비교하는 데이터가 한번이라도 임계치보다 큰 값을 가지면 아크사고로 판단하는 방식이므로 순간적인 노이즈에 대한 대책이 필요하다. 부하의 급변은 순간적인 노이즈로 인한 대표적인 오작동 유발 요소이다. 부하가 급변하는 경우 전류가 급격한 기울기를 가지고 변하게 되는데 이때 전류는 순간적으로 전 대역에 걸쳐 높은 주파수 성분을 가지게 된다. 부하 급변으로부터 발생된 높은 주파수 성분은 아크사고로 인식될 만큼 큰 크기를 가지기 때문에 아크사고 검출기의 오작동을 유발할 가능성이 있다.

순간적인 노이즈에 의한 오작동 방지를 위해 제안된 알고리즘은 그림 3.32에 나타난 데이터 평균화 과정을 수행한다. 두 번째 조건에 포함된  $k_2$ 는 평균화할 데이터의 개수를 결정하며 평균화된 데이터는  $F_a$ 에 저장되어 임계치와 비교된다. 파라미터 설계에 대한 자세한 내용은 4장에서 다룬다.

그림 3.33은 첫 번째 데이터 프로세싱을 하기 전과 후의 데이터 비교이다. 분석에 사용한 데이터는 24 W LED 드라이버 입력 전류의 전력 스펙트럼 밀도이다. 해당 데이터는 기저대역의 주파수 성분은 상당히 낮게 나타나지만 70 kHz 부근에서 드라이버의 스위칭 주파수 특성이 강하게 나타나는 것이 특징이다. 또한, 유심히 살펴 볼 것은 스위칭 주파수 성분이 비교적 넓게 나타난다는 것이다. 이러한 특성은 LED 드라이버가 고정 주파수 구동이 아닌 가변 주파수 구동을 하기 때문에 나타나는 현상이다. 해당 LED 회로는 임계 도통 모드(Boundary Conduction Mode, BCM)로 구동되는 플라이백 회로로 입력전압과 부하의 크기에 따라 영 전압 스위칭(Zero Voltage Switching, ZVS)을

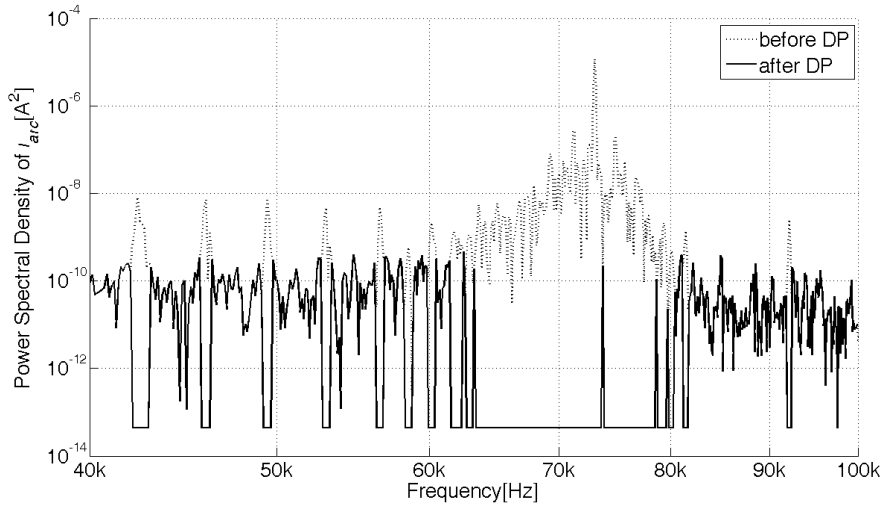


그림 3.33 데이터 프로세싱 적용에 따른 주파수 스펙트럼 비교.

위하여 구동 주파수가 바뀐다 [96]. 전력변환기의 주파수 변동은 공진형 타입의 전력변환기에서도 나타나기 때문에 스위칭 주파수 변동으로 인한 스펙트럼 폭의 변화를 감안하여 여유를 두고 아크사고 검출기를 설계해야 한다 [97]. 제안된 아크사고 검출 방법은 (3.8)이 만족하지 않을 때까지 데이터 프로세싱을 계속해서 수행하기 때문에 넓은 대역의 노이즈에도 강인하게 동작한다.

그림 3.33을 통해 제안된 데이터 프로세싱이 전력변환기 스위칭 노이즈를 대부분 제거함으로써 검출기 오작동을 억제할 수 있음을 알 수 있다. 실제 알고리즘은 노이즈로 판단되는 데이터를 0으로 치환한 후 보정하지만 그림에서는 데이터 프로세싱의 효과를 잘 나타내기 위하여 스펙트럼 데이터의 최소값으로 치환하였다.

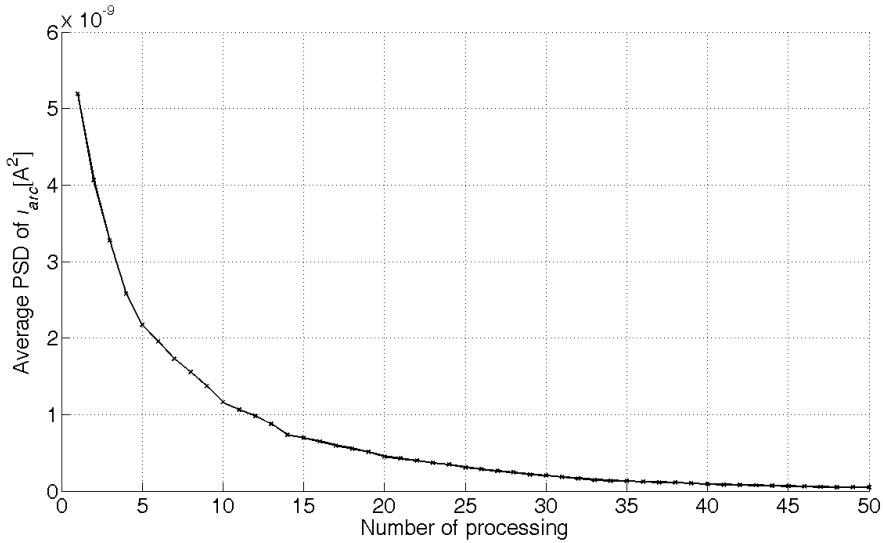


그림 3.34 데이터 프로세싱 횟수에 따른 PSD 평균 변화.

그림 3.34는 위에서 보인 LED 램프 회로의 데이터 프로세싱 횟수 증가에 따른 전력 스펙트럼 밀도의 평균값 변화를 보인다. 평균값에 비해 최대 10,000배 이상 크게 나타나는 스위칭 주파수 특성의 영향이 제거됨에 따라 주파수 스펙트럼의 평균값이 정상 수치로 돌아오는 것을 통해 제안한 데이터 프로세싱의 효과를 확인할 수 있다.

그림 3.35는 데이터 프로세싱에 따른 전력 밀도 스펙트럼의 평균값 감소를 비율로 나타낸다. 그림에서 Y축의 평균값 감소 비율은  $n$ 번째 데이터 프로세싱 직후 데이터의 직전 데이터에 대한 비율을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 알고리즘 초기에 최대값을 가지는 대역에 대한 데이터 프로세싱의 효과가 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 이는 제안된 데이터 프로세싱의 적용 유무가 검출기의 검출 성능에 상당한 영향을 미칠 것임을 암시한다.

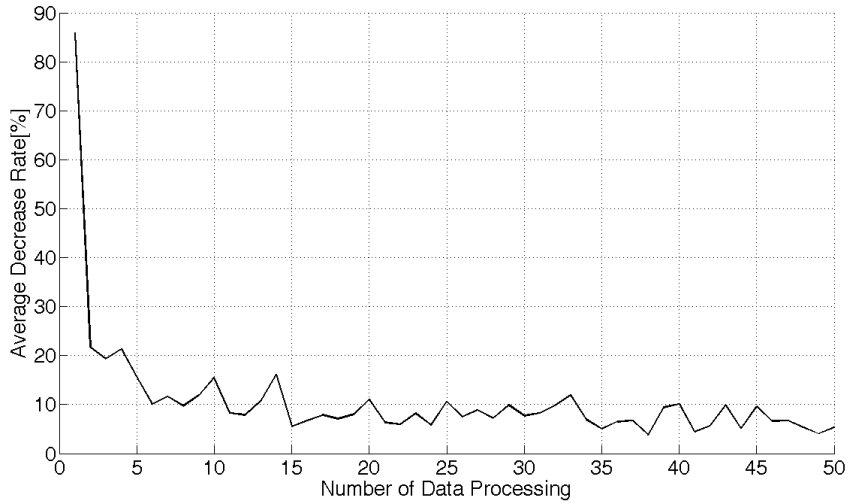


그림 3.35 데이터 프로세싱에 따른 주파수 스펙트럼 평균값 감소.

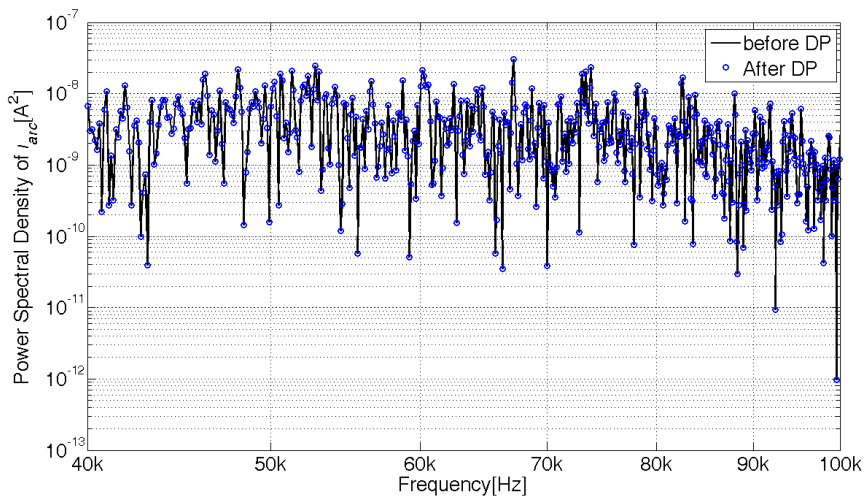


그림 3.36 저항부하(700 W)에서 아크사고 데이터 프로세싱.

그림 3.36은 700 W 저항 부하(전류 약 1.8 A)에서 아크사고가 발생한 경우 주파수 스펙트럼과 데이터 프로세싱 후의 결과를 함께 보인다. 저항 부하 조건에서 사고상태 스펙트럼 데이터는 전력변환기의 스위칭 노이즈를 포함하지 않으므로 데이터 프로세싱의 조건 (3.8)을 만족하지

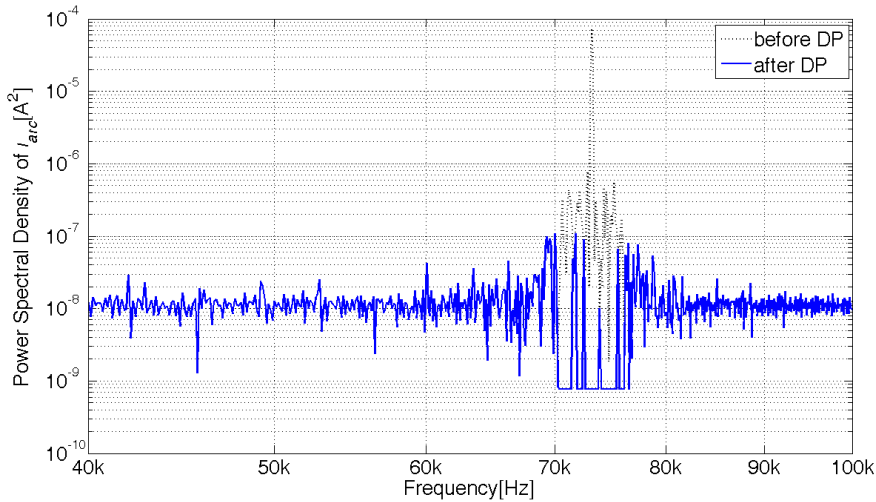


그림 3.37 부하 연동 중 아크사고 시 데이터 프로세싱.

않아 프로세싱 후에도 데이터에 변화가 없다. 이러한 조건에서 제안된 검출 기법은 프로세싱이 적용되지 않은 아크사고 검출방법과 동일한 성능을 보일 것임을 예측할 수 있다.

그림 3.37은 DC PC, DC TV, LED 램프 및 400 W 저항 부하가 함께 구동중인 상황에서 아크를 발생시켰을 때 얻은 주파수 스펙트럼과 이를 프로세싱한 데이터의 스펙트럼을 비교한다. 그림과 같이 데이터에 전력변환기의 스위칭 주파수 성분이 관측됨에 따라 제안된 데이터 프로세싱이 수행된다. 데이터 프로세싱에 따라 전력 스펙트럼 밀도는 그림 3.38처럼 평균치가 1/10 이하로 감소한다. 전력변환기의 스위칭 주파수 성분이 나타나는 주파수 대역은 검출기의 관측 대역폭에 비해 상당히 좁지만 기저대역에 비해 크기가 훨씬 커서 데이터의 평균에 큰 영향을 미친다.

제안된 데이터 프로세싱을 적용한 아크사고 검출기는 정상상태뿐만

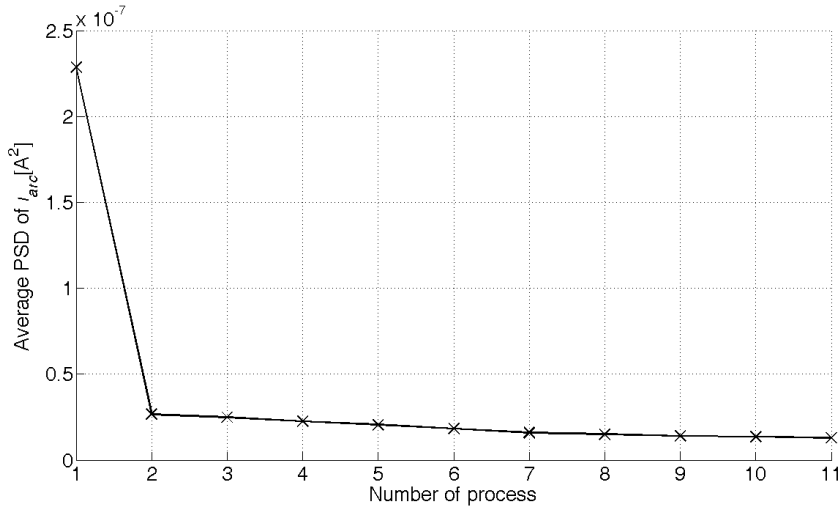


그림 3.38 데이터 프로세싱에 따른 스펙트럼 평균값 변화.

아니라 사고상태에서도 전력변환기의 영향을 효과적으로 억제함으로써 검출기의 미작동 및 오작동 확률을 설계한대로 낮게 보장하는데 도움이 될 것이다. 제안된 알고리즘의 설계 파라미터 결정에 대한 논의는 4장에서 진행한다.

### 3.3 요약

3장에서는 통계적 방법을 통해 실험 데이터에 기반을 둔 높은 신뢰성을 가지는 아크사고 검출 방법에 대해 논의하였다. 먼저 실험으로부터 얻은 데이터의 정규성 검정을 수행하고, 데이터가 정규성을 가지지 않으면 Box-Cox 변환 및 Johnson 변환을 통해 정규성을 가지도록 하여 정규분포 특성을 이용한 데이터 분석이 가능함을 보였다. 또한, t검정을 통해 정상상태 데이터와 아크사고 데이터 간의 유의미한 차이가 있음을

보임으로써 통계적 방법의 적용 가능성을 확인하였다. 실험 데이터로부터 미검출 및 오검출 확률 곡선을 도출하여 검출 임계치 변화에 따라 조건별 검출기 신뢰성을 제시할 수 있음을 보였다.

다음으로 직류 마이크로그리드 환경에서 아크사고 검출기의 오작동 유발 요인으로 작용하는 전력변환기의 구동에 대해 논의하고, 전력변환기의 스위칭 노이즈를 억제할 수 있는 방안에 대해서 논의하였다. 창 함수를 이용하여 데이터의 해상도를 높이고, 전력 스펙트럼 밀도 데이터에 포함되는 노이즈 성분을 제거하는 데이터 프로세싱 방법을 제안하였다. 논문에서 제안하는 아크사고 검출 알고리즘의 구동 원리를 순서도를 통해 설명하고 설계 파라미터의 설계방법과 의미에 대해 논의하였다. 마지막으로 제안된 데이터 프로세싱의 효과를 실험 데이터를 이용하여 검증하였다.

## 제 4 장 아크사고 검출기의 구현 및 검증

4장에서는 직류 마이크로그리드 환경에 적합한 아크사고 검출기의 구현에 대해서 논의하고 검증용 하드웨어를 구현함으로써 제안된 검출기의 효용성을 검증한다.

### 4.1 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기의 구현

4.1은 직류 마이크로그리드용 아크사고 검출기의 구현에 대해 논의한다. 그림 4.1은 3장에서 제안된 아크사고 검출기의 하드웨어 개념도를 나타낸다. 본 논문에서는 전류의 주파수 성분 분석과 지능적 알고리즘의

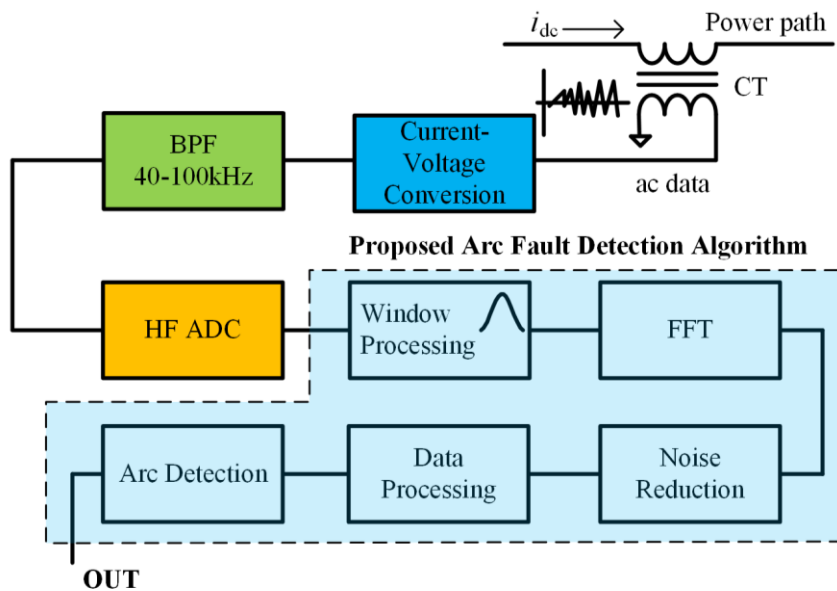


그림 4.1 제안된 아크사고 검출기의 하드웨어 개념도.



표 4.1 아크사고 검출기 구현을 위한 하드웨어 정보.

하드웨어	내용
전류 변압기	1:200, Pulse, Ferrite
고속 ADC	16 bit, 250 kS/s, SM73201, TI
DSP	TMS320F28035, 60 MHz, TI

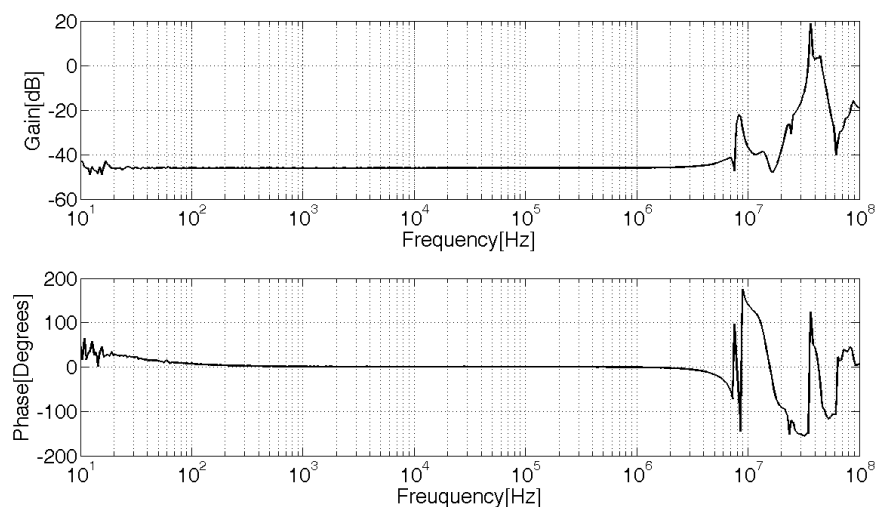


그림 4.2 프로토타입에 사용된 전류 변압기의 주파수 이득.

구현을 위해 DSP를 사용한다. 또한, 아크사고의 발생 여부를 판단하는데 이용하는 주파수 대역의 데이터 취득을 위해 대역 통과 필터를 사용한다. 제안된 아크사고 검출기는 직류 회로에 흐르는 상대적으로 작은 크기의 전류 데이터를 분석하여 검출해야 하므로 높은 정확도를 가지는 ADC를 필요로 한다. 표 4.1은 아크사고 검출기 구현에 사용된 하드웨어 제원을 제시한다. 검증용 하드웨어는 전로에 흐르는 고전압 충전부에서 전류의 AC 정보 취득을 위해 전류 변압기를 사용한다. 변압기는 1:200의 권선비로 구성된 Pulse 社의 Ferrite 변압기로 주파수 이득 특성은 그림 4.2에 나타난 것처럼 약 3 MHz 대역까지 왜곡 없이 신호를 전달한다.

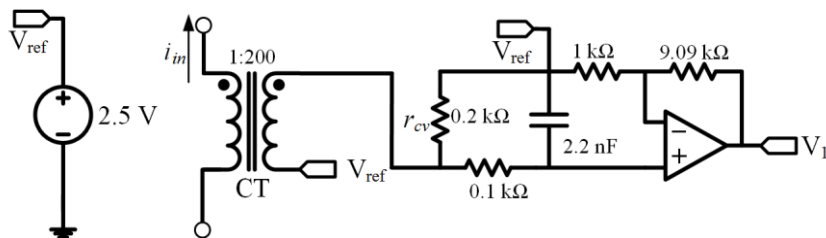


그림 4.3 전류 변압기 및 전류-전압 변환 회로.

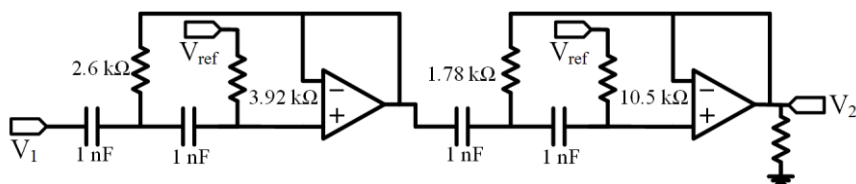


그림 4.4 대역 통과필터 구성#1: 고역 통과 필터( $f_{ch}$ : 40 kHz).

검증용 하드웨어는 높은 분해능으로 아날로그 신호를 디지털로 변환하기 위하여 별도의 16 bit ADC를 사용한다. ADC는 250 kHz로 구동되며 최대 125 kHz 대역의 주파수 성분 관측이 가능하다. DSP는 비용효율성을 고려하여 TI 社의 Piccolo DSP를 사용하였다.

그림 4.3은 전류 변압기로부터 들어오는 전류를 전압으로 변환하는 회로이다. 이 회로는  $r_{cv}$ 를 통해 전류 변압기의 2차단으로 흐르는 전류가 전압으로 바뀌며 신호 증폭을 위해 10배의 이득을 가지는 증폭기를 이용한다.

검출기 하드웨어는 본 논문에서 제안한 전력변환기 노이즈 억제방법의 검증을 위해 밴드#3에 해당되는 40~100 kHz 대역의 데이터를 사용하여 아크사고를 검출한다. 하지만 2장에서 논의한 것처럼 다른 밴드도 사용

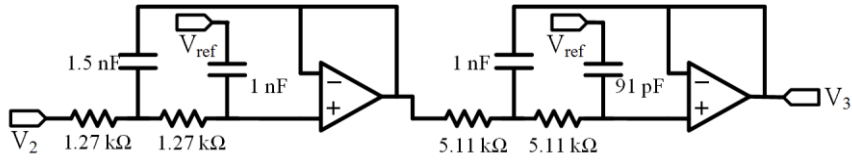


그림 4.5 대역 통과 필터 구성#2: 저역 통과 필터( $f_{cL}$ : 100 kHz).

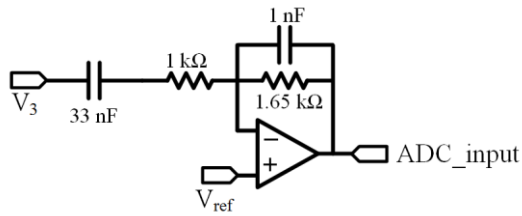


그림 4.6 ADC 입력 전 이득 조정 회로.

환경 및 조건을 고려하여 효과적이라고 판단되면 적용 가능하다. 그림 4.4, 그림 4.5, 그림 4.6은 데이터 필터링(filtering)을 위한 대역 통과 필터 회로 및 이득 조정 회로를 보인다. 필터 회로는 40 kHz의 차단 주파수를 가지는 고역 통과 필터(High Pass Filter, HPF)와 100 kHz의 차단 주파수를 가지는 저역 통과 필터(Low Pass Filter, LPF)를 직렬로 연결하여 40~100 kHz 대역의 신호만을 통과 시킨다. 논문에서 사용된 대역 통과 필터는 TI 社의 아크사고 검출기 평가 회로 RD-195를 참고하였다.

그림 4.7은 대역 통과 필터의 이득 특성을 보이며 통과대역인 40~100 kHz에서 23.5 dB에 해당하는 최대 이득을 보인다. 추가적으로 ADC모듈에서 DSP로 들어오는 데이터의 이득을 고려하면 총 이득은 105.9 dB가 되며, 이 이득을 감안하여 DSP 내부에서 사용하는 검출

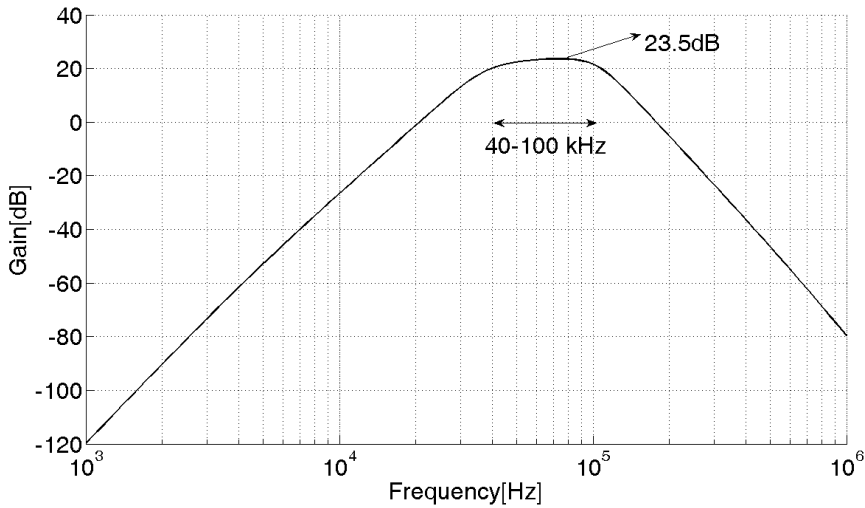


그림 4.7 설계된 대역 통과 필터의 이득.

임계치를 설계값으로부터 결정한다.

아크사고 검출기의 파라미터는 검출 정확도 및 노이즈에 대한 강인함에 영향을 미친다. 아크사고 검출기 구현에서 고려해야 할 파라미터는 데이터 프로세싱에 관련된  $k_1$ , 평균화할 데이터의 개수를 결정하는  $k_2$ , 고속 푸리에 변환을 위한 샘플 수  $N$ , 샘플링 빈도  $T_p$ 가 있다.

아크사고 검출기의 노이즈 억제력에 영향을 미치는 상수  $k_1$ 은 너무 작을 경우 과도하게 많은 데이터 프로세싱으로 사고상태를 정상상태로 판단하는 미검출 확률을 증가시킬 수 있다. 반대로 과도하게 큰  $k_1$ 은 전력변환기의 노이즈가 주파수 스펙트럼의 평균값에 근접해 있을 때 필터링이 어렵게 하여 정상상태를 사고상태로 판단하는 오검출 확률을 증가시킬 수 있으므로 신중하게 결정하여야 한다. 본 논문에서는 2장에서 얻은 실험 데이터를 이용하여  $k_1$ 을 결정한다. 그림 4.8은 2장에서 보인 180개 전력 스펙트럼 밀도 데이터 각각의 평균값과 최대값 크기 간

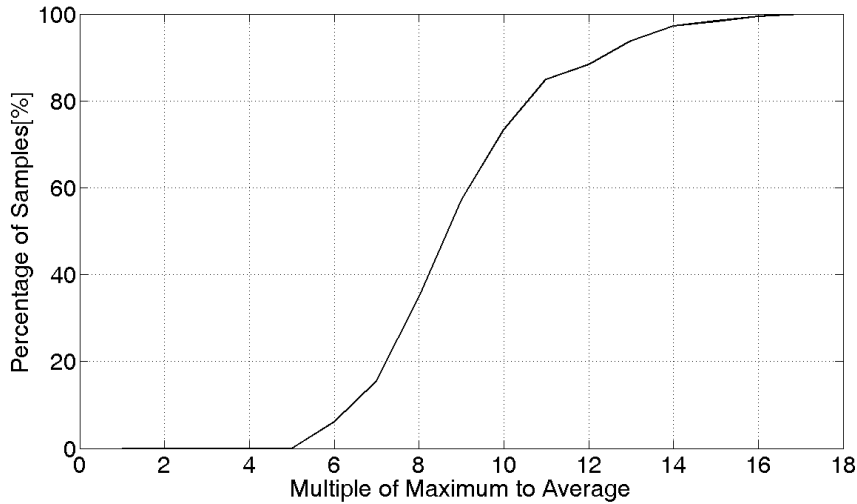


그림 4.8 전류의 전력 스펙트럼 밀도의 평균값에 대한 최대값의 배수.

비율의 통계를 보인다. 그림을 통해서 최대값은 평균값 대비 최소 5배 이상의 크기를 보이며, 약 90%의 데이터가 5배 이상에서 12배 이하의 범위에 해당함을 알 수 있다. 본 논문에서는 그림 4.8을 참고하여 전력변환기 노이즈에 의한 적당한 데이터 프로세싱과 원본 데이터 보존을 위해 여유를 두어  $k_1$ 을 20으로 설정하였다.

평균화하는 데이터의 개수를 결정하는 상수  $k_2$ 는 검출기가 순간적인 신호에 민감하게 반응하지 않도록 하여 오검출 확률을 줄인다. 아크사고가 화재를 일으키기 위해서는 에너지의 누적이 필요하기 때문에 아주 짧은 순간 동안만 세기가 강한 신호는 아크사고로 검출하지 않도록 한다. 부하의 온/오프 동작 및 부하 급변 조건이 이에 대한 대표적인 예이다. 부하 온/오프 동작과 급변 순간 전류는 백색 노이즈(White noise)와 같이 전대역에 걸쳐 강한 주파수 스펙트럼을 보이기 때문에 이로 인한 오작동이 발생하지 않도록 충분히 큰  $k_2$ 를 적용해야 한다.

또한, 직류 스위치는 전류 차단 동작에서 순간적으로 강한 아크를 발생시키므로 이 또한 고려하여 일정시간 이상 유지되지 않는 아크는 검출하지 않도록 해야 한다. 또한, 데이터 평균화에서 하나의 데이터가 가질 수 있는 최대값을 제한하여 짧은 시간 동안 발생하는 큰 크기의 노이즈가 미치는 영향을 제한한다. 본 논문에서는 효과적인 오작동 억제에 위해  $k_2$ 를 5로 설정하였다.

아크사고 검출기가 고속 푸리에 변환을 위해 한번에 가져오는 전류 데이터의 개수  $N$ 은 같은 샘플링 주파수를 사용했을 때 얻어지는 고속 푸리에 변환의 결과물인 주파수 데이터의 밀집도를 결정한다. 밀집도가 큰 데이터는 정확한 주파수 스펙트럼을 얻게 하는 장점이 있지만, 처리 데이터의 크기 증가는 프로세서의 계산시간 증가를 발생시키기 때문에 하드웨어의 성능 및 가격도 고려하여 적당히 설계해야 한다.

샘플링 주기  $T_p$ 는 정해진 시간 동안 얻는 데이터 세트의 개수를 결정하며 프로세서의 연산능력 및 아크사고 검출기의 소비 전력과 관계가 있다. 샘플링을 통해 데이터를 취득한 후 고속 푸리에 변환을 수행하고 결과물을 통해 데이터 프로세싱 및 아크사고 여부를 판단하는데 필요한 연산 시간을 먼저 고려해서  $T_p$ 의 최소값을 결정할 수 있다. 최소값으로  $T_p$ 를 선택하면 데이터를 자주 가져올 수 있지만 샘플링의 빈도는 아크사고 검출기가 소모하는 평균 소비 전력에도 영향을 미치므로 검출기 설계에 고려사항이 된다.

검증용 하드웨어는 고속 푸리에 변환용 데이터로 1,024개의 데이터를 샘플링한다. 외부 ADC를 이용한 250 kHz 샘플링에서 1,024개의 데이터는 주파수 변환의 결과물이 약 244 Hz의 간격을 가지게 하는데, Hamming 창 함수의 주엽 넓이 및 부엽의 감쇠를 고려하여 5개의



그림 4.9 아크사고 검출기 하드웨어.

테이터를 0으로 치환하므로 1회에 약 1 kHz대역의 주파수 대역이 처리된다. 제안된 검출기법의 빠른 검출 성능을 검증해 보이기 위해  $T_p$ 는 20 ms로 설정하였다. 마지막으로 아크 검출기의 검출 임계치  $K_{th}$ 는 앞서 3장에서 논의하였던  $1E-5$ 로 결정하였다.

그림 4.9는 아크사고 검출 검증용 하드웨어를 보인다. 검출기 우측에는 직류 24 V가 입력되어 전원을 공급하며, 사고 검출 시 high에서 low로 변경되는 출력 A와, 반대로 low에서 high로 변경되는 신호 출력 B가 위치하여 분기 차단을 위한 스위치 제어에 이용될 수 있다.

그림 4.10과 그림 4.11은 각각 아크사고 검출기의 앞면과 뒷면을 보인다. 그림에는 검출기 구성요소들의 PCB(Printed Circuit Board)상 위치를 표시하였다. 검출기는 UL1699B규정에 의거하여 동작상태를 표시하는 LED와 아크사고 검출을 표시하는 LED를 가지며, 사고에 대한 조치 후 잠금상태를 해제할 수 있는 재시작(Reset) 버튼을 또한 가진다.

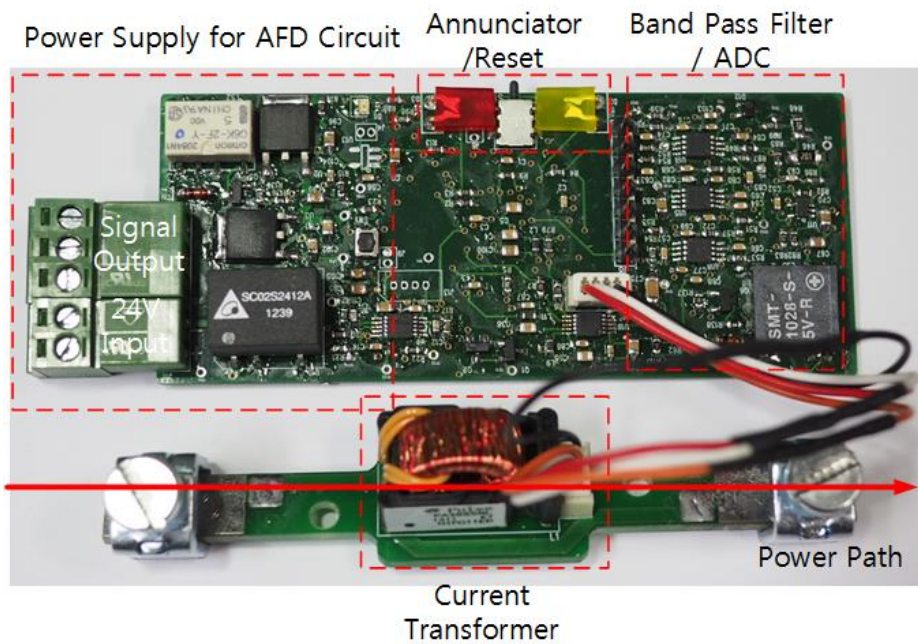


그림 4.10 아크사고 검출기 시제품 회로의 앞면.

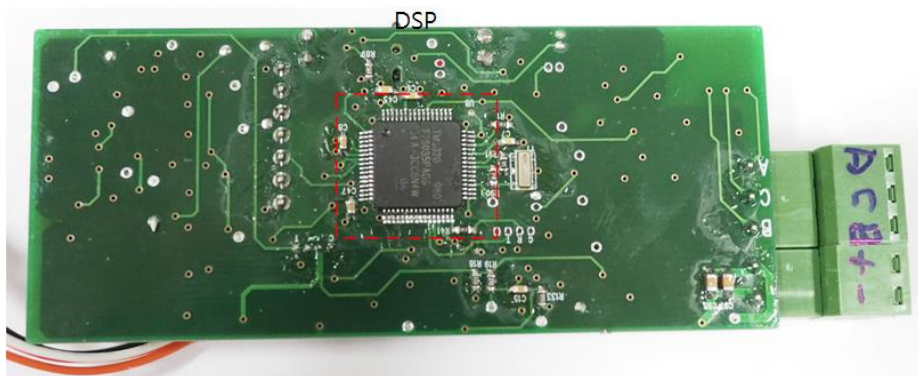


그림 4.11 아크사고 검출기 시제품의 뒷면.



## 4.2 아크사고 검출기의 동작 검증

4.2는 구현된 아크사고 검출기의 동작을 실험을 통해 검증한다. 검증은 크게 둘로 나눠 시행한다. 먼저 제안된 아크사고 검출기가 노이즈가 적은 저항부하 조건에서 아크사고를 잘 검출하는지 검증한다. 다음으로 검출기의 전력변환기 노이즈에 의한 오작동 억제, 부하의 온/오프 동작에 대한 강인함을 실험으로 검증한다.

### 4.2.1 아크사고 검출 성능에 대한 검증

4.2.1은 아크사고 검출기의 검출 특성을 논의한다. 그림 4.12는 1.25 A 조건에서 0.8 mm 전극간격을 가지는 아크사고가 발생했을 때 실험 결과이다. 실험에서 아크는 약 30 W의 전력크기를 보이며 아크사고 검출기는 아크사고 발생 후 약 0.18초에 아크사고를 검출한다. 사고 검출에는 0.18초가 소요되어 UL1699B에 규정된 최소시간인 0.8초보다 훨씬 빠른 동작 특성을 보이지만 아크사고가 검출된 후 스위치에 검출신호가 전달되어 스위치가 분기전류를 완전히 차단하는데 걸리는 시간 또한 고려해야 한다. 본 논문에서는 400 V/8 A 정격의 Fujitsu 社 직류 릴레이의 응답시간 30 ms를 고려하였으며 사고 검출에서 스위치 동작까지 충분히 빠른 응답이 보장된다. 보호 장치마다 차단에 요구되는 시간이 다르기 때문에 시스템에 설치된 스위치의 동작특성을 고려하여 응용 대상에 맞게 아크사고 검출기를 설계해야 한다.

구현된 아크사고 검출기의 사고 검출 성능을 보이기 위해 앞서 제시했던 20개의 조건에서 모의아크 발생을 통해 사고 검출 실험을

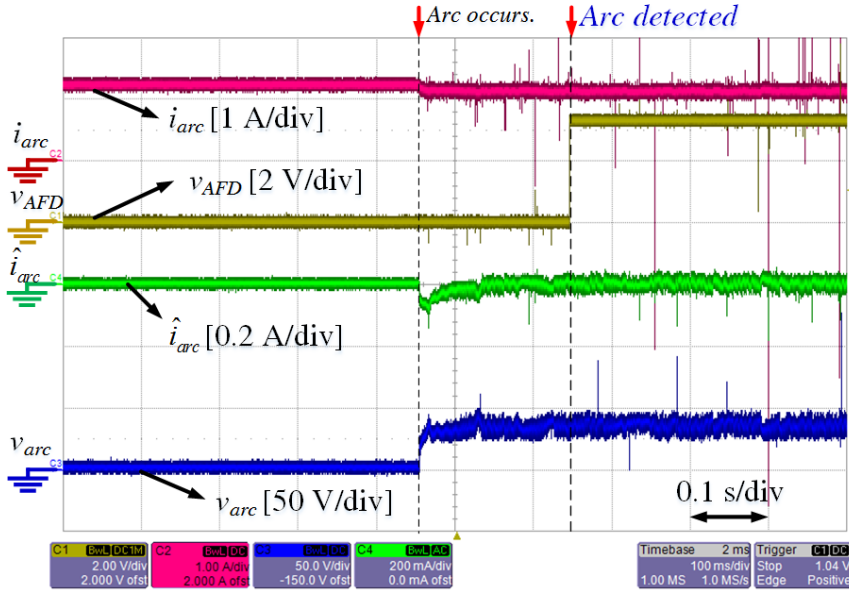


그림 4.12 아크사고 검출기의 동작 시험(부하 1.25 A, 전극간격 0.8 mm).

시행하였으며 표 4.2는 각 조건에서의 검출결과를 보인다. 제시된 데이터는 조건당 1회 시행에 대한 결과이며 모든 조건에서 오작동은 발생하지 않았다. 검출기의 신뢰성은 3장에서 보인 통계적 방법을 이용한 실험 데이터 기반의 미검출 및 오검출 확률 수치로 보장되므로 반복 실험은 하지 않았다. 20 ms의 샘플링 주기, 설계 파라미터 및 표 3.4에 제시한 오작동 확률을 고려하면 구현된 아크사고 검출기가 UL1699B에서 제시하는 최소검출 시간의 절반인 0.4초 안에 아크사고를 검출할 확률  $P_{fp}^*$  는 0.4초간 4회의 검출 판단을 할 수 있게 되므로 (4.1)과 같다.

$$P_{fp}^* = 1 - P_{fp}^4 \quad (4.1)$$

표 4.2 실험 조건에 따른 아크사고 검출시간.

조건	검출시간[s]	조건	검출시간[s]
1.25 A/0.8 mm	0.18	3.75 A/0.8 mm	0.18
1.25 A/1.6 mm	0.17	3.75 A/1.6 mm	0.19
1.25 A/2.4 mm	0.16	3.75 A/2.4 mm	0.17
1.25 A/3.2 mm	0.14	3.75 A/3.2 mm	0.16
1.25 A/4.0 mm	0.13	3.75 A/4.0 mm	0.18
2.5 A/0.8 mm	0.15	5 A/0.8 mm	0.17
2.5 A/1.6 mm	0.14	5 A/1.6 mm	0.18
2.5 A/2.4 mm	0.14	5 A/2.4 mm	0.19
2.5 A/3.2 mm	0.12	5 A/3.2 mm	0.17
2.5 A/4.0 mm	0.15	5 A/4.0 mm	0.21

표 4.3 아크사고 검출기 하드웨어의 오작동 확률.

조건	미검출/오검출 [ppm]	조건	미검출/오검출 [ppm]
1.25 A/0.8 mm	0.000/0.000	3.75 A/0.8 mm	0.000/3.341
1.25 A/1.6 mm	0.000/0.035	3.75 A/1.6 mm	0.263/0.000
1.25 A/2.4 mm	0.000/0.076	3.75 A/2.4 mm	3.384/0.002
1.25 A/3.2 mm	0.000/0.316	3.75 A/3.2 mm	8.789/0.000
1.25 A/4.0 mm	0.000/0.000	3.75 A/4.0 mm	1.415/0.001
2.5 A/0.8 mm	0.004/0.000	5 A/0.8 mm	0.000/0.000
2.5 A/1.6 mm	2.028/269.9	5 A/1.6 mm	0.003/62.251
2.5 A/2.4 mm	0.000/2.491	5 A/2.4 mm	6.499/0.000
2.5 A/3.2 mm	9.821/0.081	5 A/3.2 mm	8.476/0.000
2.5 A/4.0 mm	0.000/0.000	5 A/4.0 mm	0.031/0.001

식에서  $P_{fp}$  는 표 3.4에 제시한 검출기 1회 동작에 대한 미검출 확률이다. 결과적으로 아크사고 검출기 하드웨어의 아크사고 정상 검출 확률은 99.999% 이상이며, 사고상태를 정상상태로 판단하는 미검출 확률은 최대 9.821 ppm, 정상상태를 아크로 판단하는 오검출 확률은 최대 269.9 ppm이다. 구현된 아크사고 검출기의 조건별 미검출 및 오검출 확률 수치는 표 4.3에 정리하였다.

#### 4.2.2 오작동 억제 성능에 대한 검증

4.2.2는 아크사고 검출기의 오작동 억제 성능을 실험을 통해 검증한다. 제안된 아크사고 검출기는 전력변환기가 검출기 동작에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 창 함수를 이용해 전력 스펙트럼 밀도 데이터의 해상도를 올리고 전력변환기의 영향으로 보이는 데이터를 제거한다. 직류 마이크로그리드 환경에는 다양한 종류의 부하, 전원이 연결될 수 있지만 전력변환기를 통해 연결되는 구성요소의 경우 스위칭 주파수 특성이 강하게 나타난다는 공통적인 특징을 가진다. 따라서 본 논문에서는 대표적인 직류 부하인 조명용 LED 램프의 구동에 대한 오작동 억제 성능을 검증함으로써 제작된 하드웨어의 효용성을 검증한다. 또한, 추가적인 오작동 유발 요인인 부하의 온/오프에 따른 검출기의 동작 실험을 통해 제안된 사고 검출 방법을 검증한다.

그림 4.13은 제안된 스위칭 노이즈 억제 방법이 적용되지 않은 아크사고 검출기의 동작을 보인다. 그림은 5 A의 저항성 부하전류가 흐르고 있는 상태에서 약 0.6초에 24 W LED 램프를 구동한 실험파형이다. 그림과 같이 아크사고 검출기는 저항성 부하전류가 흐르는 조건에서는 정상상태로 인식을 하다가 73 kHz 부근에 강한 주파수 스펙트럼을 가지는 LED 드라이버가 동작하자 약 0.72초에 오검출을 일으킨다. LED 드라이버의 전류는 약 60 mA로 저항부하에 비해 매우 작지만 드라이버가 인가하는 스위칭 주파수 대역의 강한 AC 성분은 지능적 알고리즘이 적용되지 않은 아크사고 검출기에 오작동을 일으킨다.

그림 4.14는 밴드#3에 해당하는 LED 드라이버 구동 전류의 전력 스펙트럼 밀도를 앞서 보인 20개의 사고상태 데이터와 함께 보인다.

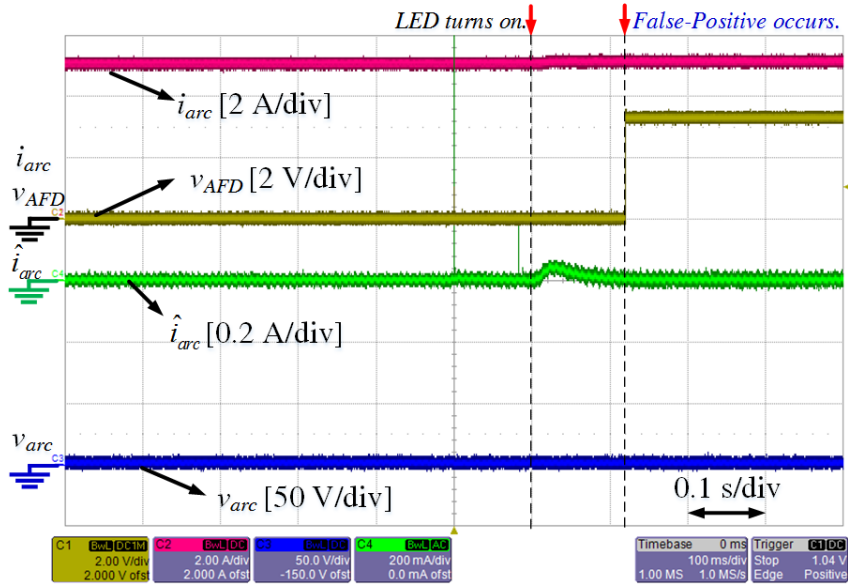


그림 4.13 데이터 프로세싱 적용 전 아크사고 검출기 동작.

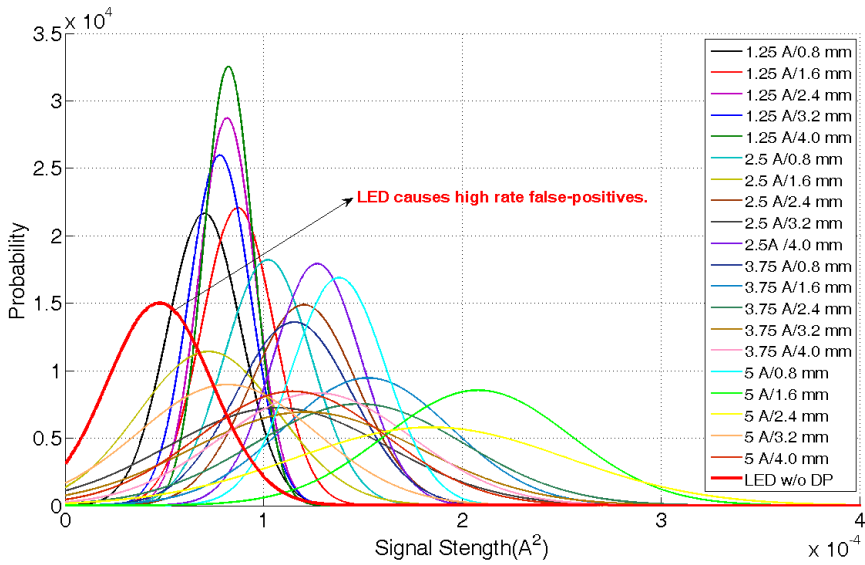


그림 4.14 LED 드라이버 구동 시 전류의 전력 스펙트럼 밀도.

그림과 같이 데이터 프로세싱이 적용되지 않은 LED 드라이버 전류 데이터는 강한 스위칭 노이즈 성분으로 인해 사고상태의 확률분포만큼 큰

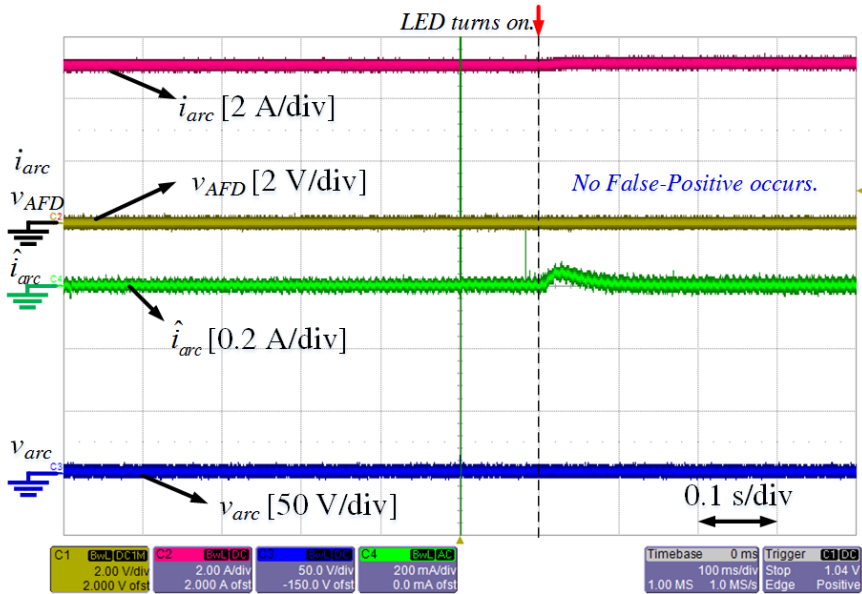


그림 4.15 제안된 아크사고 검출기의 동작.

분포를 보인다. 따라서 데이터 프로세싱이 적용되지 않은 아크사고 검출기는 LED 드라이버에 의해 상당히 높은 확률로 오작동 할 것이다. 데이터 프로세싱이 적용되지 않은 아크사고 검출기가 동일한 하드웨어 설계 임계치  $1E-5$ 를 적용한다고 가정하면, LED 드라이버에 의한 오검출 확률은 92.085%로 예측된다.

그림 4.15는 제안된 데이터 프로세싱이 적용된 아크사고 검출기의 동작 파형을 보인다. 실험조건은 5 A의 저항 부하에 직류용 24 W LED 램프 구동으로 그림 4.13과 동일하다. 그림과 같이 0.6초 부근에 LED 드라이버가 동작함에 따라 AC 전류에 변화가 생기지만 제안된 아크사고 검출기는 스위칭 노이즈를 억제하기 때문에 LED 램프 구동 후에도 오작동하지 않는다. 이러한 결과는 제안된 아크사고 검출기가 전력변환기의 영향에 강인한 특성을 보임을 검증한다.

그림 4.16은 데이터 프로세싱을 거친 LED 드라이버 전류의 전력

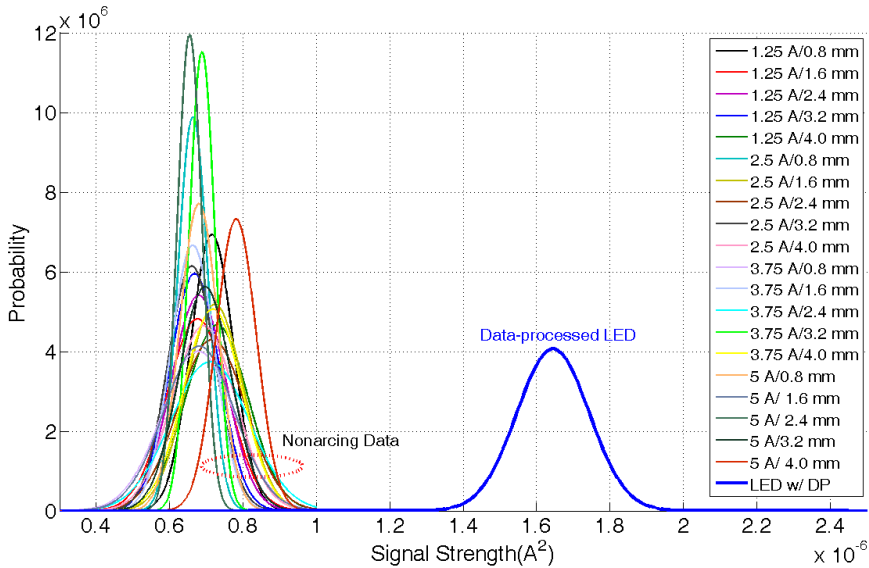


그림 4.16 데이터 프로세싱 후 LED 드라이버 전류 PSD의 확률 분포.

스펙트럼 밀도에 대한 확률분포를 보인다. 그림과 같이 LED 드라이버 구동 데이터는 데이터 프로세싱에 의해 스위칭 주파수 성분이 제거됨에 따라 좌측의 정상상태 데이터 집단에 근접한 분포를 보인다. 제안된 데이터 프로세싱이 적용된 하드웨어의 오검출 확률은 0.000 ppm으로 대폭 감소하여 제안된 방법의 효과를 검증한다.

다음으로 부하의 온/오프 동작에 따른 검출기의 오작동 억제 실험을 진행한다. 부하의 온/오프 동작은 대표적인 오작동 유발 요인인데, 부하가 켜지고 꺼질 때 백색 노이즈 특성을 가지는 매우 큰 크기의 주파수 성분이 발생 되기 때문이다. 그림 4.17은 부하가 0 A에서 5 A로 급격하게 증가하는 순간에 나타나는 전류의 전력 스펙트럼 밀도이며, 상대적인 비교를 위해 5 A, 4 mm 전극간격 조건의 사고상태 스펙트럼 밀도를 함께 보인다. 그림에서 보인 것처럼 부하 전류의 급격한 변화는

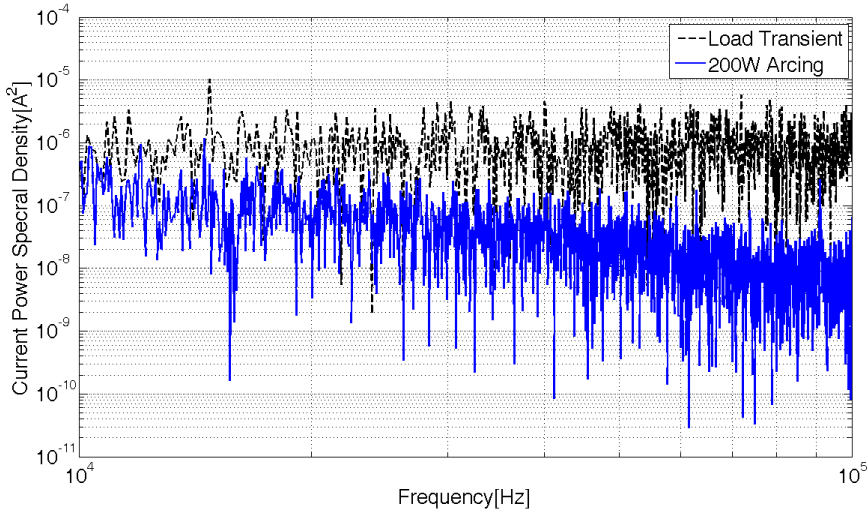


그림 4.17 부하의 급격한 상승 시 주파수 스펙트럼.

200 W의 아크 발생 조건보다 순간적으로 더 큰 노이즈를 발생시킨다. 제안된 아크사고 검출기는 부하 급변 조건과 같은 순간적인 노이즈로부터 강인한 동작을 위해 데이터 평균화를 수행한 후 사고 여부를 판단하므로 이로 인한 오작동 확률이 낮다.

추가적으로, 부하의 급격한 증가 및 감소에 따른 아크사고 검출과 관련하여 차단 스위치의 동작도 고려되어야 한다. 앞서 언급했듯 직류의 차단은 영점의 부재로 인해 교류의 차단에 비해 상당히 어렵다. 이는 스위치가 전류를 차단하기 위해서 스위치의 접점이 떨어질 때 순간적인 아크가 발생하여 전류의 신속한 차단을 막기 때문이다. 스위치의 차단 동작에서 발생하는 아크는 전류 차단을 위한 정상적인 과정이기 때문에 아크사고 검출기가 반응해서는 안 된다. 하지만 일정 시간 이상의 긴 스위치 아크는 스위치를 파괴하고 아크사고와 동일하게 화재를 발생시킬 수 있으므로 사고로 고려하여 차단해야 할 것이다. 따라서 시스템



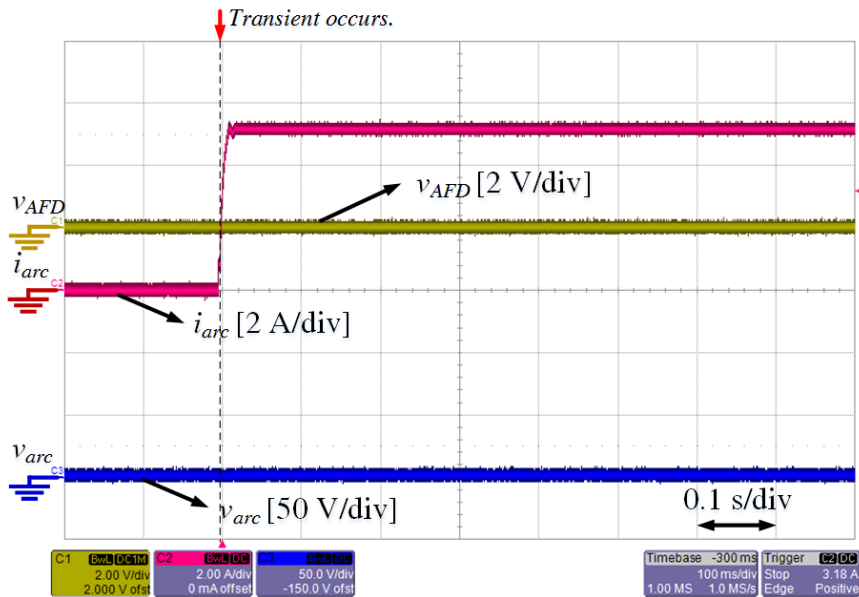


그림 4.18 부하의 급격한 증가에 따른 검출기 동작.

설계자는 이와 같은 특성을 확인하여 아크사고 검출기의 설계에 반영해야 한다.

그림 4.18은 위에 설명한 부하의 급격한 증가 조건에서 제안된 검출기의 오작동 억제 성능을 검증하는 실험파형이다. 그림과 같이 약 0.2초에 부하가 0 A에서 약 5 A로 급격하게 증가하며 이에 따라 주파수 스펙트럼이 순간적으로 증가하지만 제안된 아크사고 검출기는 오작동 하지 않고 정상 동작함을 알 수 있다.

그림 4.19는 부하의 급격한 감소 실험 파형이다. 약 0.2초에 부하를 켜를 때 제안된 아크사고 검출기는 오작동 하지 않고 정상 동작함을 알 수 있다.

추가적으로 전자기기 최초 동작에서 일어날 수 있는 큰 초기 충전

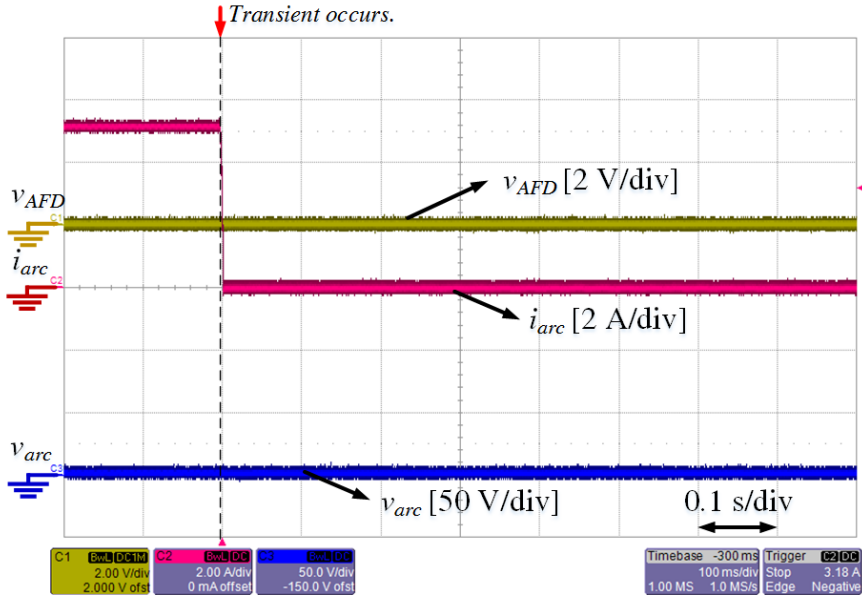


그림 4.19 부하의 급격한 감소에 따른 검출기 동작.

전류에 의한 오작동 억제 실험을 시행하였다. PC는 대표적인 중요 부하(Critical load)로 전원 차단 시에도 데이터 백업 등을 위해 Hold-up 시간이 요구된다 [98]. 따라서 이러한 중요 부하군은 직류 시스템에 적용될 때에도 교류 시스템과 마찬가지로 입력부에 큰 입력 커패시터를 설치하는 등의 방법을 이용하여 전원이 차단되더라도 일정 시간 동안 부하가 동작할 수 있도록 해야 한다 [4]. 입력부의 큰 커패시터는 전력변환기가 최초로 연결 배선에 연결될 때 직류 배전 전압과의 큰 전위 차로 인해 짧은 시간 동안 큰 전류가 유입될 수 있으므로 NTC(Negative Temperature Coefficient)특성을 가지는 저항 삽입과 같은 보완방법을 사용하여 시스템을 보호해야 한다. 그림 4.20은 직류 PC 구동에 따른 아크사고 검출기의 동작을 보인다. 실험에서 직류 PC의 동작은 초기 충전 전류를 효과적으로 억제하여 검출기 오작동이 발생하지 않는다. 또한,

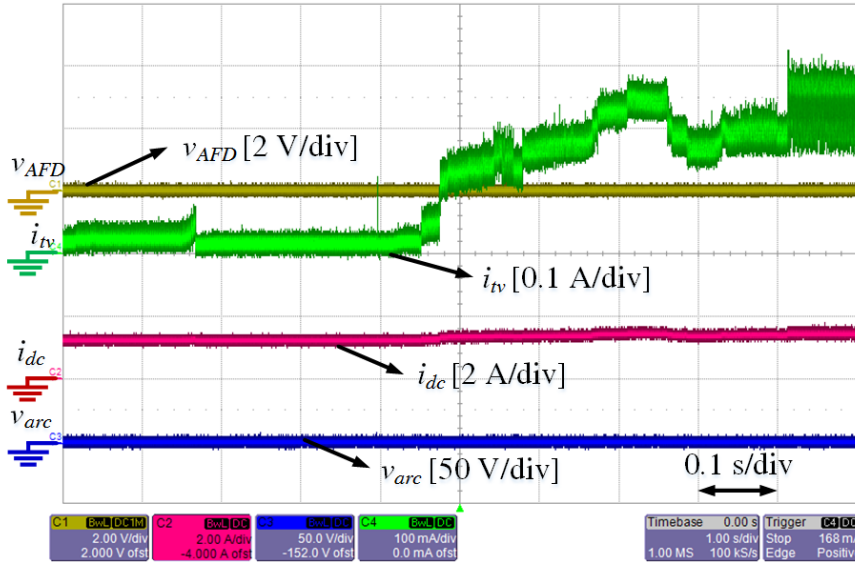


그림 4.20 직류 PC 구동 시 검출기 동작.

검출기 하드웨어는 부하 변동이 빈번하고 비교적 많은 노이즈를 발생시키는 PC의 구동에도 오작동하지 않고 정상 동작함을 증명한다.

### 4.3 요약

4장에서는 3장에서 도출된 실험 데이터 기반의 아크사고 검출 방법을 하드웨어로 구현하여 제안된 방법의 효용성을 검증하였다. 검출기 하드웨어는 전류의 AC 성분을 취득하기 위한 전류 변압기, 원하는 주파수 대역 데이터 취득을 위한 대역 통과 필터, 아날로그 데이터 취득을 위한 ADC, 데이터 프로세싱을 위한 DSP로 구성하였으며 검출 신호를 통해 차단 스위치를 구동할 수 있도록 하는 등의 부가기능이 제공된다. 검증용 하드웨어의 사고 검출 특성을 검증하기 위하여 앞서

보인 전류 및 전극간격 변화에 따른 검출실험을 진행하였으며 3장에서 도출한 미검출, 오검출 확률로부터 제안된 검출기는 99.999% 이상의 검출 확률과 269.9 ppm 이하의 오작동 확률을 보여준다.

또한, 오작동 억제와 관련하여 검출 대역에서 강한 주파수 스펙트럼을 발생시키는 24 W LED 드라이버를 이용하여 데이터 프로세싱 전과 후의 실험을 통해 제안된 알고리즘의 효용성을 검증하였다. 추가적으로 부하의 급격한 증가, 감소에 대한 오작동 억제 실험 및 초기 충전 전류에 따른 검출기의 오작동 여부를 확인함으로써 제안된 아크사고 검출기의 효용성을 검증하였다.

## 제 5 장 결론 및 향후 과제

### 5.1 결론

본 논문은 직류 마이크로그리드의 광범위한 응용을 가능하게 하는데 필수적인 아크사고 검출에 관해 논의하였다. 직류 시스템에서 아크사고는 교류 환경보다 자연 소호가 어려워 더 위협적이다. 본 연구에서는 부하와 직렬로 발생하여 사고전류가 제한되기 때문에 일반 과전류 차단기로 검출이 어려워 병렬 아크에 비해 접근이 어려운 직렬 아크에 초점을 맞추어 논의를 진행하였다.

직류 마이크로그리드에 적용 가능성이 큰 380 V 직류 환경에서 아크사고의 전기적인 특성을 파악하기 위하여 전류 및 전극간격의 변화에 따른 아크의 DC 특성 및 AC 특성에 대해 분석하였다. DC 특성 분석 결과, 평균 아크 전압과 전류 그리고 전극간격의 관계를 수식으로 도출할 수 있었다. 또한, AC 특성 분석을 통해 전류의 AC 성분과 아크사고 변수 간의 관계를 분석한 결과, 전류의 전력 스펙트럼 밀도와 아크사고의 규모 간에 상관관계가 있으므로 대략적인 경향성은 존재하지만, 아크 신호의 넓은 산포로 인해 정확한 아크사고 규모 예측에 직접적인 활용은 어렵다는 결론을 얻었다. 하지만 아크 전류의 전력 스펙트럼 밀도는 정상상태 신호와 비교하면 넓은 대역에 걸쳐 주파수 성분이 증가하는 특성을 가지기 때문에 이를 통한 아크사고 검출은 가능하다는 결론을 얻었다.

아크사고 검출에 활용도가 높은 주파수 대역은 비교적 주변환경의 영향이 적고 정상상태와 사고상태의 차이가 분명하게 나타나는

1 kHz~150 kHz 영역의 밴드#2와 밴드#3이며 적용 환경에 맞게 선택할 수 있다. 계통연계에 따라 100/120 Hz 고조파의 영향을 받는 밴드#1과 아크 신호의 핑크 노이즈 특성으로 인해 점차 신호가 작아 기저 대역의 노이즈와 구별이 힘든 밴드#4는 직류 마이크로그리드에서 사고 검출에 적용하기 어려울 것으로 판단된다.

본 논문에서는 조건에 따라 정해진 값을 가지지 않고 넓은 산포를 보이는 아크 신호 데이터를 기반으로 아크사고 검출 방법을 도출하기 위해 통계적 해석 기법을 도입하였다. 실험에서 얻어진 각 조건에서의 정상상태 및 사고상태 데이터의 정규성을 분석하고 정규분포를 따르지 않는 데이터의 경우 Box-Cox 또는 Johnson 변환을 통해 정규화함으로써 정규분포의 특성을 이용한 사고 검출 및 오작동 확률에 대한 논의가 가능해진다. 본 논문에서는 밴드#3에 해당하는 전력 스펙트럼 밀도 데이터를 분석함으로써, 아크검출기의 검출 임계치에 따른 미검출 및 오검출 확률을 고려하고 알맞은 검출방법 도출을 통해 시스템 요구사항을 만족하는 검출기 설계가 가능함을 보였다.

직류 마이크로그리드 대부분의 구성요소는 반도체 스위치를 이용한 전력변환기를 통해 연계되므로 전력변환기가 발생시키는 노이즈는 아크사고 검출기의 오작동을 유발할 가능성이 크다. 본 논문에서는 전력변환기가 검출기 성능에 미치는 영향을 전력변환기 및 아크의 AC 모델을 통해 분석하고, 검출기가 전력변환기 노이즈에 강인하게 동작할 수 있도록 하는 데이터 프로세싱 기법을 제안하였다. 제안한 노이즈 억제 방법은 창 함수를 이용하여 주파수 스펙트럼의 해상도를 높이고 데이터 프로세싱을 통해 전력변환기의 스위칭 주파수 성분을 제거함으로써 아크사고 검출에 전력변환기가 미치는 영향을 최소화한다.

제안한 아크사고 검출 방법의 검증을 위해 검출기 하드웨어를 제작하고 실험 결과를 제시하였다. 앞선 분석을 바탕으로 아크사고 검출기의 임계치 및 검출 파라미터를 결정하고, 기타 요인에 의한 오작동 억제를 위해 데이터 평균화 기법을 적용하였다. 저항 부하에서 발생하는 아크사고 실험을 통해 아크사고 검출기의 검출 동작을 검증하였으며, 대표적인 전력변환기 부하인 LED 램프 드라이버를 이용하여 검출기의 전력변환기 노이즈로 인한 오작동 억제 성능을 검증하였다. 추가로 부하의 급격한 변동에 대한 오작동 억제 실험을 통해 제안된 아크사고 검출방법의 유효성을 검증하였다.

본 논문에 제시한 통계적 방법을 이용한 문제 해결은 수학적 해석이 어려워 명확한 해답을 얻을 수 없는 문제에 적용하여, 실험 데이터를 기반으로 실용적이면서 신뢰성을 보장할 수 있는 해결방법을 도출하는 기본 방법론을 제공하는데 추가적인 의의를 가진다

## 5.2 향후 과제

분산전원의 보급 증가 및 직류 부하의 급증에 따라 구성요소 간 연계가 효율적이고 높은 Resiliency를 가져 고품질의 전원을 구성할 수 있는 직류 마이크로그리드에 대한 관심이 증가하고 있다. 하지만 직류 시스템의 안전성 확보를 위한 기술 연구와 개발이 아직 많이 부족한 실정이다. 시스템 보호 기술은 직류 상용화에 필수적이므로 많은 부분에 있어 활발한 연구가 필요하며, 아크사고 검출 및 보호에 대한 논의도 이러한 중요한 기술적 범주에 포함된다.

아래는 본 논문의 한계를 기술하고 추가적인 연구가 가능한 부분을

논의함으로써 후학에 도움이 되도록 한다.

본 논문은 시스템 구성 요소들이 직류 배전에 연결되는 전로의 임피던스가 매우 작다고 가정하고 다수 부하가 한 개의 아크사고 검출기에 미치는 영향에 초점을 맞췄다. 하지만 넓은 영역에 걸쳐 다양한 구성요소들이 배전에 연결되는 직류 마이크로그리드 시스템에서 배선 임피던스의 영향은 무시할 만큼 작지 않기 때문에 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다. 특히 배선 임피던스에 의한 아크사고 신호의 감쇠는 아크사고 검출기의 검출가능 영역을 제한하기 때문에 배선 임피던스의 감쇠 효과를 고려한 복수의 검출기 운용 방안에 대한 연구가 필요하다.

배선 임피던스는 사고 신호를 감쇠하여 검출기의 검출 가능 영역을 제한하지만, 복수의 검출기를 운용할 때 인접 검출기의 원치 않는 오작동을 억제하는 긍정적인 측면도 가진다. 배선 임피던스로 인한 감쇠 특성을 분석하면 인접 사고 신호로부터 발생하는 오작동을 억제하는 검출 방법을 도출할 수 있을 것이다.

또한, 사고 신호의 감쇠 현상을 이용하면 사고로부터 가장 가까운 곳(임피던스 상으로)에 위치한 검출기가 사고 신호의 크기를 가장 크게 받아들이게 함으로써 단락사고에 대한 복수 차단기의 보호협조 동작(전류-시간 특성)과 같은 개념으로 아크사고에 대한 시스템적 보호 동작을 구현할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 상대적으로 중요도가 높은 직렬 아크에 대한 연구를 진행하였으나 병렬 아크에 대한 연구 또한 필요하다. 병렬 아크는 비교적 큰 사고 전류를 발생시켜 과전류 차단기에 의해 검출될 가능성이 크지만, 검출되지 않을 경우 직렬 아크보다 위험도가 높기 때문에 NEC에서도 차후 병렬 아크에 대한 규제를 추가할 가능성이 있다. 병렬 아크로부터



보호를 위해 직류 시스템에서 병렬 아크의 전기적인 특성에 대한 연구 및 이에 기반한 사고 검출에 대한 연구를 진행할 필요가 있다. 또한, 아크사고 검출에 있어서 직렬 아크와 병렬 아크를 구별하는 방법에 대한 추가적인 연구도 필요하다.

## 참고문헌

- [1] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "An adaptive control system for a dc microgrid for data centers," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 1910-1917, Nov./Dec. 2008.
- [2] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, "Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high quality distribution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010.
- [3] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziaargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids management," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May/Jun. 2008.
- [4] P. Cairolì, "Fault protection in dc distribution systems via coordinated control of power supply converters and bus tie switches," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., University of South Carolina, Columbia SC, 2013.
- [5] P. Cairolì and R. A. Dougal, "New horizons in dc shipboard power systems: new fault protection strategies are essential to the adoption of dc power systems," *IEEE Electrific. Mag.*, vol. 1, no. 2, pp. 38-45, Dec. 2013.
- [6] H. Nikkhajoei and R. H. Lasseter, "Microgrid protection," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-6.
- [7] D. Salomonsson, L. Soder, and A. Sannino, "Protection of low-voltage dc microgrids," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, pp. 1045-1053, Jul. 2009.
- [8] P. Salonen, P. Nuutinen, P. Peltoniemi, and J. Partanen, "LVDC distribution system protection - Solutions, implementation and measurements," in *Proc.*

- European Conf. Power Electronics and Applications*, 2009, pp. 1-10.
- [9] M. K. Alam, F. H. Khan, J. Johnson, and J. Flicker, "PV faults: Overview, modeling, prevention and detection techniques," in *Proc. IEEE Workshop Control and Modeling Power Electronics*, 2013, pp. 1-7.
  - [10] W. Choi and B.-H. Cho, "Topology and control design of converters for short-circuit fault protection in dc microgrids," in *Proc. IEEE Industrial Electronics Conf.*, 2013, pp. 1386-1391.
  - [11] P. Cairoli, I. Kondratiev, and R. A. Dougal, "Controlled power sequencing for fault protection in dc nanogrids," in *Proc. Int. Conf. Clean Electrical Power*, 2011, pp. 730-737.
  - [12] T. R. de Oliveira, A. S. Bolzon, and P. F. Donoso-Garcia, "Grounding and safety considerations for residential dc microgrids," in *Proc. IEEE Industrial Electronics Conf.*, 2014, pp. 5526-5532.
  - [13] J. Johnson, *et al.*, "Photovoltaic dc arc fault detector testing at Sandia National Laboratories," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2011, pp. 3614-3619.
  - [14] F. Schimpf and L. E. Norum, "Recognition of electric arcing in the dc-wiring of photovoltaic systems," in *Proc. IEEE Int. Telecommunications Energy Conf.*, 2009, pp. 1-6.
  - [15] H. Laukamp, *et al.*, "PV fire hazard-analysis and assessment of fire incidents," in *Proc. European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Paris, 2013, pp. 1-8.
  - [16] H. Haeberlin and M. Real, "Arc detector for remote detection of dangerous arcs on the dc side of PV plants," in *Proc. European Photovoltaic Solar*

- Energy Conf.*, 2007, pp. 1-6.
- [17] J. D. Johnson, "Arc-fault detection and mitigation in PV systems: industry progress and future needs," Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA SAND2012-1314C 442325, 2012.
  - [18] *National Electric Code*. NFPA 70, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2011.
  - [19] *Outline of Investigation for Photovoltaic DC Arc-Fault Circuit Protection*. UL1699B, 2011.
  - [20] G.-S. Seo, H. Bae, B.-H. Cho, and K.-C. Lee, "Arc protection scheme for dc distribution systems with photovoltaic generation," in *Proc. Int. Conf. Renewable Energy Research and Applications*, 2012, pp. 1-5.
  - [21] G. D. Gregory, K. Wong, and R. F. Dvorak, "More about arc-fault circuit interrupters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 4, pp. 1006-1011, Jul./Aug. 2004.
  - [22] *General requirements for arc fault detection devices*. IEC 62606, 2013.
  - [23] L. Kumpulainen, G. A. Hussain, M. Lehtonen, and J. A. Kay, "Preemptive arc fault detection techniques in switchgear and controlgear," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 4, pp. 1911-1919, Jul./Aug. 2013.
  - [24] B. England, "An investigation into arc detection and fire safety aspects of photovoltaic installations," B.S. thesis, School of Engineering and Energy, Murdoch Univ., Perth, Western Australia, 2012.
  - [25] C. E. Restrepo, "Arc fault detection and discrimination methods," in *Proc. IEEE Holm Conf. Electrical contacts*, 2007, pp. 115-122.
  - [26] C. Hong, C. Xiaojuan, L. Fangyun, and W. Cong, "Series Arc Fault Detection

- and Implementation Based on the Short-time Fourier Transform," in *Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf.*, 2010, pp. 1-4.
- [27] W.-S. Kwon, S.-K. Choi, C.-H. Ban, S.-B. Bang, C.-M. Kim, and G.-H. Choe, "A study on the effect of arc fault on switched-mode power supply," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electronics and ECCE Asia*, 2011, pp. 3029-3032.
- [28] X. Yao, L. Herrera, and J. Wang, "A series dc arc fault detection method and hardware implementation," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Expo.*, 2013, pp. 2444-2449.
- [29] J. Keenan and M. Parker, "Arc detectors," in *Proc. IEEE Int. Telecommunications Energy Conf.*, 1998, pp. 710-715.
- [30] J. Johnson and J. Kang, "Arc-fault detector algorithm evaluation method utilizing prerecorded arcing signatures," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2012, pp. 1378-1382.
- [31] Z. Wang, S. McConnell, R. S. Balog, and J. Johnson, "Arc fault signal detection - Fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2014, pp. 3239-3244.
- [32] G. Yunmei, W. Li, W. Zhuoqi, and J. Binfeng, "Wavelet packet analysis applied in detection of low-voltage dc arc fault," in *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Electronics and Applications*, 2009, pp. 4013-4016.
- [33] J. Johnson, D. Schoenwald, S. Kuszmaul, J. Strauch, and W. Bower, "Creating dynamic equivalent PV circuit models with impedance spectroscopy for arc fault modeling," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists*

- Conf.*, 2011, pp. 2328-2333.
- [34] Y.-S. Oh, J. Han, G.-H. Gwon, D.-U. Kim, and C.-H. Kim, "Development of fault detector for series arc fault in low voltage dc distribution system using wavelet singular value decomposition and state diagram," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 766-776, Oct. 2015.
  - [35] G.-S. Seo, K. A. Kim, K.-C. Lee, K.-J. Lee, and B.-H. Cho, "A new dc arc fault detection method using dc system component modeling and analysis in low frequency range," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Expo.*, 2015, pp. 2438-2444.
  - [36] J. Johnson, C. Oberhauser, M. Montoya, A. Fresquez, S. Gonzalez, and A. Patel, "Crosstalk nuisance trip testing of photovoltaic dc arc-fault detectors," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2012, pp. 1-5.
  - [37] C. Luebke, T. Pier, B. Pahl, D. Breig, and J. Zuercher, "Field test results of dc arc fault detection on residential and utility scale PV arrays," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2011, pp. 1832-1836.
  - [38] G. Artale, A. Cataliotti, V. Cosentino, and G. Privitera, "Experimental characterization of series arc faults in ac and dc electrical circuits," in *Proc. IEEE Int. Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, 2014, pp. 1015-1020.
  - [39] M. K. Alam, F. Khan, J. Johnson, and J. Flicker, "A comprehensive review of catastrophic faults in PV arrays: types, detection, and mitigation techniques," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 5, no. 3, pp. 982-997, May 2015.
  - [40] K.-J. Lee, G.-S. Seo, and B. Cho, "DC arc fault detection method for dc microgrid using branch monitoring," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power*

*Electronics and ECCE Asia*, 2015, pp. 2429-2434.

- [41] S. Bieniek, *et al.*, "Fire prevention in PV plants using inverter integrated AFCI," in *Proc. European Photovoltaic Solar Energy Conf.*, Hamburg, Germany, 2011, pp. 3199-3203.
- [42] J. Shea, "Conditions for series arcing phenomena in PVC wiring," in *Proc. IEEE Holm Conf. Electrical Contacts*, 2005, pp. 167-175.
- [43] R. Grassetti, R. Ottoboni, M. Rossi, and S. Toscani, "A low-cost arc fault detector for aerospace applications," in *IEEE AUTOTESTCON*, 2012, pp. 239-243.
- [44] J. Johnson, *et al.*, "Differentiating series and parallel photovoltaic arc-faults," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2012, pp. 720-726.
- [45] P. Muller, S. Tenbohlen, R. Maier, and M. Anheuser, "Characteristics of series and parallel low current arc faults in the time and frequency domain," in *Proc. IEEE Holm Conf. Electrical Contacts*, 2010, pp. 1-7.
- [46] D. A. Dini, P. W. Brazis, and K.-H. Yen, "Development of arc-fault circuit-interrupter requirements for photovoltaic systems," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2011, pp. 001790-001794.
- [47] J.-M. Martel, M. Anheuser, and F. Berger, "Time-current tripping characteristics at series arcing for arc fault detection devices," in *Proc. Int. Conf. Electrical Contacts*, 2014, pp. 361-366.
- [48] K. M. Armijo, J. Johnson, R. K. Harrison, K. E. Thomas, M. Hibbs, and A. Fresquez, "Quantifying photovoltaic fire danger reduction with arc-fault circuit interrupters," *Prog. Photovoltaics*, 2014.
- [49] K. M. Armijo, J. Johnson, M. Hibbs, and A. Fresquez, "Characterizing fire

- danger from low-power photovoltaic arc-faults," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2014, pp. 3384-3390.
- [50] J. K. Hastings, M. A. Juds, C. J. Luebke, and B. Pahl, "A study of ignition time for materials exposed to dc arcing in PV systems," in *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 2011, pp. 3724-3729.
- [51] Y. H. Fu, "The influence of cathode surface microstructure on dc vacuum arcs," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 22, no. 1, p. 94, 1989.
- [52] T. E. Browne, "The electric arc as a circuit element," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 102, no. 1, pp. 27-37, Jan. 1955.
- [53] T. Gammon, W.-J. Lee, Z. Zhang, and B. C. Johnson, "A review of commonly used dc arc models," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1398-1407, Mar./Apr. 2015.
- [54] G. R. Jones, *High Pressure Arcs in Industrial Devices*. London, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1988.
- [55] R. F. Ammerman, T. Gammon, P. K. Sen, and J. P. Nelson, "DC-arc models and incident-energy calculations," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 5, pp. 1810-1819, Sep./Oct. 2010.
- [56] A. P. Strom, "Long 60-cycle arcs in air," *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, vol. 65, no. 3, pp. 113-117, 1946.
- [57] W. B. Nottingham, "Normal arc characteristic curves: dependence on absolute temperature of anode," *Phys. Rev.*, vol. 28, no. 4, pp. 764-768, Oct. 1926.
- [58] W. B. Nottingham, "A new equation for the static characteristic of the normal electric arc," *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, vol. 42, pp. 302-310, 1923.



- [59] X. Yao, L. Herrera, S. Ji, K. Zou, and J. Wang, "Characteristic study and time-domain discrete-wavelet-transform based hybrid detection of series dc arc faults," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 3103-3115, Jun. 2014.
- [60] F. M. Uriarte, *et al.*, "A dc arc model for series faults in low voltage microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 2063-2070, Dec. 2012.
- [61] Y. Liu, S. Ji, J. Wang, X. Yao, and Y. Zhu, "Study on characteristics and detection of dc arc fault in power electronics system," in *Proc. Int. Conf. Condition Monitoring and Diagnosis*, 2012, pp. 1043-1046.
- [62] H. Ayrton, *The electric arc*: Cambridge University Press, 2012.
- [63] C. P. Steinmetz, "Transformation of Electric Power into Light," *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, vol. 25, pp. 789-813, 1906.
- [64] D. B. Miller and J. L. Hildenbrand, "DC Arc Model Including Circuit Constraints," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-92, no. 6, pp. 1926-1934, Nov. 1973.
- [65] P. M. Hall, K. Myers, and W. S. Vilcheck, "Arcing faults on direct current trolley systems," in *Proc. WVU Conf. Coal Mine Electrotechnology*, Morgantown, WV: West Virginia University, 1978, pp. 1-19.
- [66] A. Stokes and W. Oppenlander, "Electric arcs in open air," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 24, no. 1, pp. 26-35, Jan. 1991.
- [67] J. Paukert, "The arc voltage and the resistance of LV fault arcs," in *Int. Symp. Switching Arc Phenomena*, TU Lodz, Poland, 1993, pp. 49-51.
- [68] J. G. Eisenhauer, "Regression through the origin," *Teaching Statistics*, vol. 25,

- no. 3, pp. 76-80, 2003.
- [69] C. J. Willmott and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance," *Climate research*, vol. 30, no. 1, p. 79, 2005.
  - [70] F. K. Blades, "Method and apparatus for detecting arcing in AC power systems by monitoring high frequency noise," U.S. Patent 5,729,145, Mar. 17, 1998.
  - [71] G. Healy and G. Roemer, "Arc fault detection using Rogowski coils," in *Proc. PCIM Europe*, 2014, pp. 1-5.
  - [72] S. W. Smith, "The scientist and engineer's guide to digital signal processing," 1997.
  - [73] M. Wendl, M. Weiss, and F. Berger, "HF characterization of low current dc arcs at alterable conditions," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electrical Contacts*, 2014, pp. 1-6.
  - [74] M. C. Di Piazza, C. Serporta, G. Tine, and G. Vitale, "Electromagnetic compatibility characterisation of the dc side in a low power photovoltaic plant," in *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial Technology*, 2004, pp. 672-677.
  - [75] M. T. Parker, H. M. Ham Jr, J. J. Keenan, and L. P. Benoit, "Electric arc monitoring systems," U.S. Patent 6,772,077, Aug. 3, 2004.
  - [76] D. P. Doane and L. E. Seward, *Applied statistics in business and economics*. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin, 2005.
  - [77] J. R. Eaton, J. K. Peck, and J. M. Dunham, "Field studies of arcing faults on power lines," *Electrical Engineering*, vol. 50, no. 11, pp. 857-860, Nov. 1931.
  - [78] H. B. Land III, C. L. Eddins, and J. M. Klimek, "Evolution of arc fault

- protection technology at APL," *Johns Hopkins APL technical digest*, vol. 25, no. 2, pp. 140-153, 2004.
- [79] T. A. Cooke, "High impedance arc fault detection in a manhole environment," Master's Thesis, East Tennessee State University, 2010.
- [80] M. Muhr and R. Schwarz, "Experience with optical partial discharge detection," *Mater. Sci.-Poland*, vol. 27, no. 4/2, pp. 1139-1146, 2009.
- [81] H. B. Land, C. L. Eddins, L. R. Gauthier, and J. M. Klimek, "Design of a sensor to predict arcing faults in nuclear switchgear," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 50, no. 4, pp. 1161-1165, Aug. 2003.
- [82] L. E. Lundgaard, "Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application," *IEEE Elect. Insul. Mag.*, vol. 8, no. 5, pp. 34-43, Sep./Oct. 1992.
- [83] F. K. Blades, "Parallel arc fault diagnostic for aircraft wiring," U.S. Patent 6,777,953, Aug. 17, 2004.
- [84] T. C. Rae, T. E. Natili, and R. T. Elms, "Arc fault detector with protection against nuisance trips and circuit breaker incorporating same," U.S. Patent 5,896,262, 1999.
- [85] K. Koziy, G. Bei, and J. Aslakson, "A low-cost power-quality meter with series arc-fault detection capability for smart grid," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 28, no. 3, pp. 1584-1591, Jul. 2013.
- [86] Y.-M. Chou, A. M. Polansky, and R. L. Mason, "Transforming non-normal data to normality in statistical process control," *J. Qual. Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 133-141, 1998.
- [87] G.-S. Seo, J. Baek, K. Choi, H. Bae, and B. Cho, "Modeling and analysis of

- dc distribution systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Electronics and ECCE Asia*, 2011, pp. 223-227.
- [88] P. Cairolì, I. Kondratiev, and R. Dougal, "Ground fault protection for dc bus using controlled power sequencing," in *Proc. IEEE SoutheastCon*, 2010, pp. 234-237.
- [89] G.-S. Seo, K. C. Lee, and B. H. Cho, "A new dc anti-islanding technique of electrolytic capacitor-less photovoltaic interface in dc distribution systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1632-1641, Apr. 2013.
- [90] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 331-347.
- [91] C. P. Basso, *Switch-mode power supplies SPICE simulations and practical designs*. New York, NY: McGraw-Hill, 2008, pp. 76-85.
- [92] R. B. Ridley, B. H. Cho, and F. C. Y. Lee, "Analysis and interpretation of loop gains of multiloop-controlled switching regulators (power supply circuits)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 3, no. 4, pp. 489-498, Oct. 1988.
- [93] "IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships," *IEEE Std 1709-2010*, pp. 1-54, 2010.
- [94] W. Astuti, W. Sediono, A. M. Aibinu, R. Akmeliawati, and M. J. E. Salami, "Adaptive short time fourier transform (STFT) analysis of seismic electric signal (SES): a comparison of hamming and rectangular window," in *Proc. IEEE Symp. Industrial Electronics and Applications*, 2012, pp. 372-377.
- [95] G. Heinzel, A. Rüdiger, and R. Schilling, "Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows,"

2002.

- [96] G. S. Seo, J. W. Shin, B. H. Cho, and K. C. Lee, "Digitally controlled current sensorless photovoltaic micro-converter for dc distribution," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 10, no. 1, pp. 117-126, Feb. 2014.
- [97] B. Yang, F. C. Lee, A. J. Zhang, and H. Guisong, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Expo.*, 2002, pp. 1108-1112.
- [98] Y. Jang, M. M. Jovanovic, and D. L. Dillman, "Hold-up time extension circuit with integrated magnetics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 2, pp. 394-400, Mar. 2006.

## 부 록

### A.1 모의 아크사고 실험 데이터

A.1은 2장에서 보인 아크사고 모의실험 파형을 제시한다. 표 2.2와 같이 모든 데이터는 380 V 직류 환경에서 획득하였으며, 전류는 1.25 A, 2.5 A, 3.75 A, 5 A 조건에서 시행하였고, 전극간격은 0.8 mm, 1.6 mm, 2.4 mm, 3.2 mm, 4.0 mm 조건에서 시행하여 총 20회의 실험파형을 보인다. 모든 파형은 1 s/div로 측정하여 10초간 데이터를 획득하여 분석 용도에 맞게 사용할 수 있도록 하였으며, 충분한 대역의 주파수 분석을 위해 샘플링 주파수는 1 MS/s로 하였다.

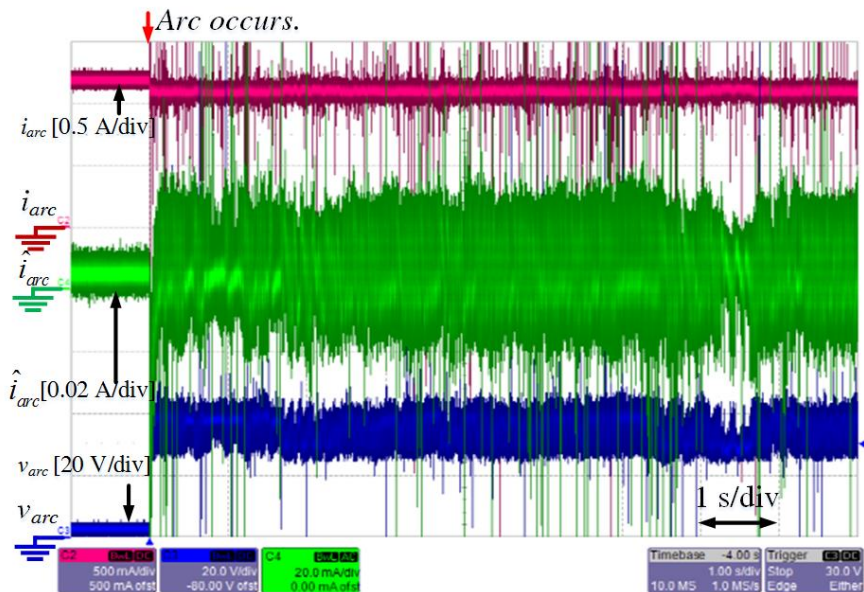


그림 A.1 아크 전류 1.25 A, 전극간격 0.8 mm 조건의 실험파형.

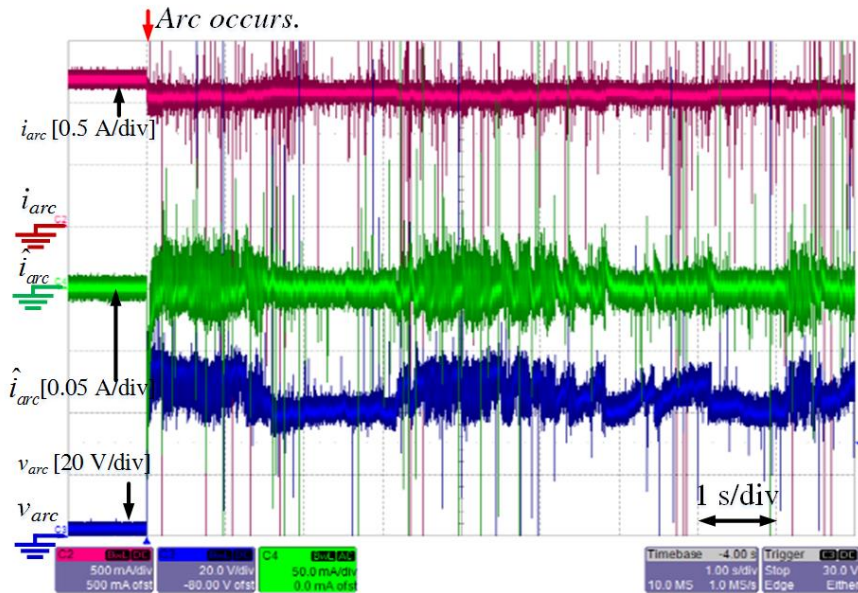


그림 A.2 아크 전류 1.25 A, 전극간격 1.6mm 조건의 실험파형.

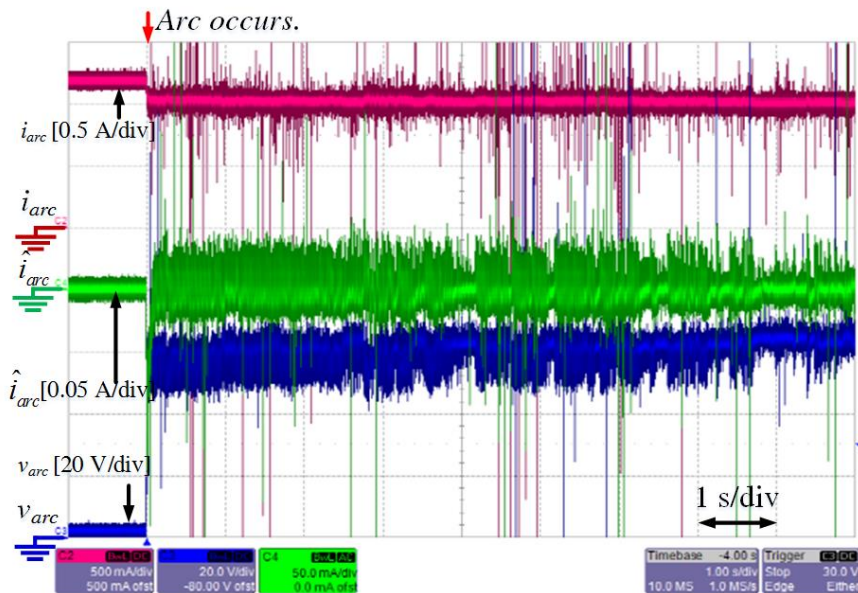


그림 A.3 아크 전류 1.25 A, 전극간격 2.4 mm 조건의 실험파형.

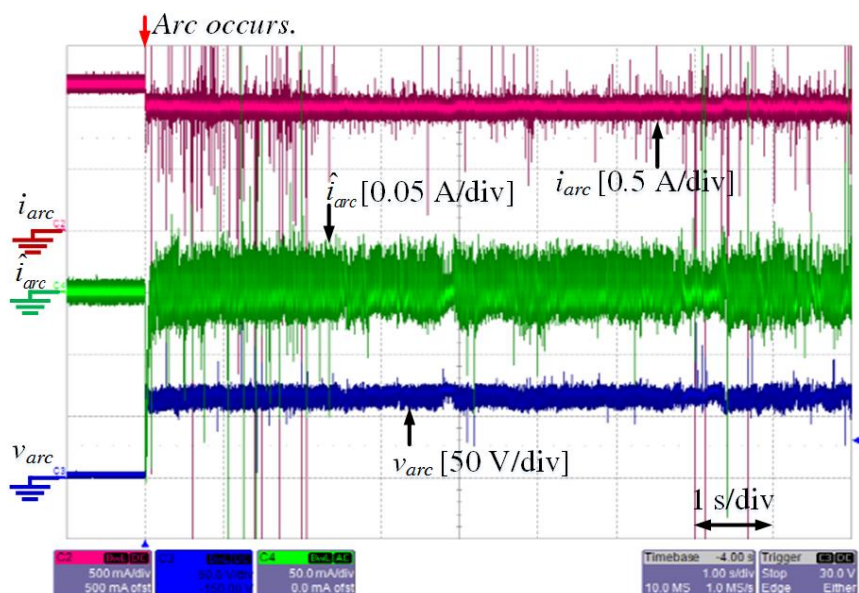


그림 A.4 아크 전류 1.25 A, 전극간격 3.2 mm 조건의 실험파형.

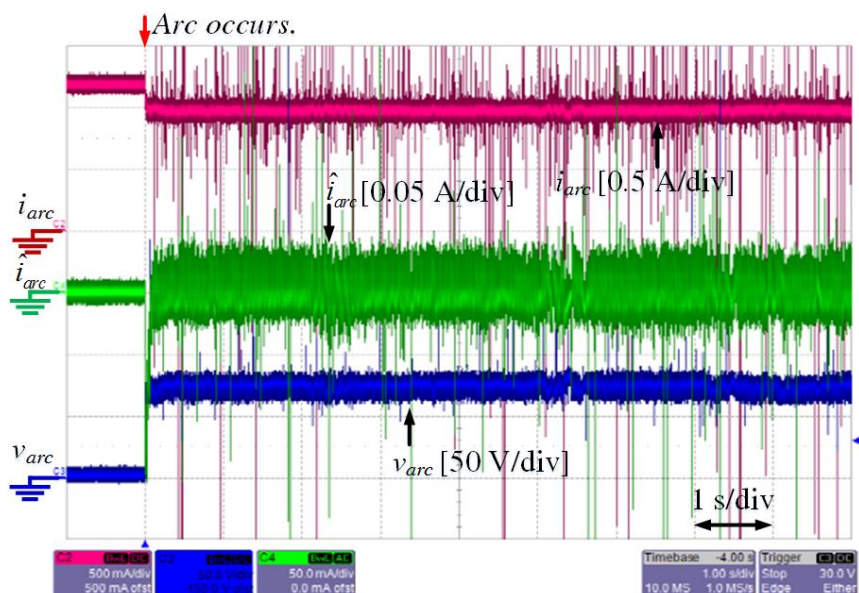


그림 A.5 아크 전류 1.25 A, 전극간격 4.0 mm 조건의 실험파형.



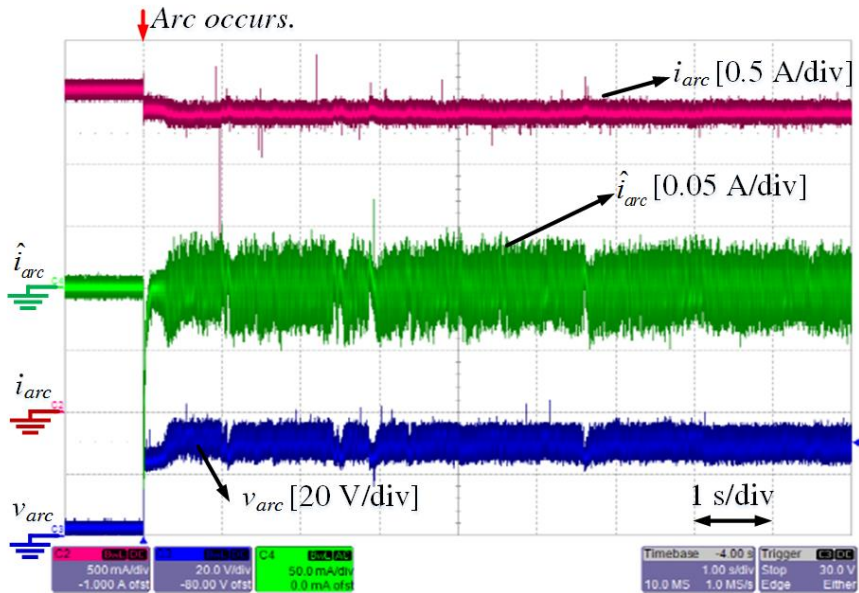


그림 A.6 아크 전류 2.5 A, 전극간격 0.8 mm 조건의 실험파형.

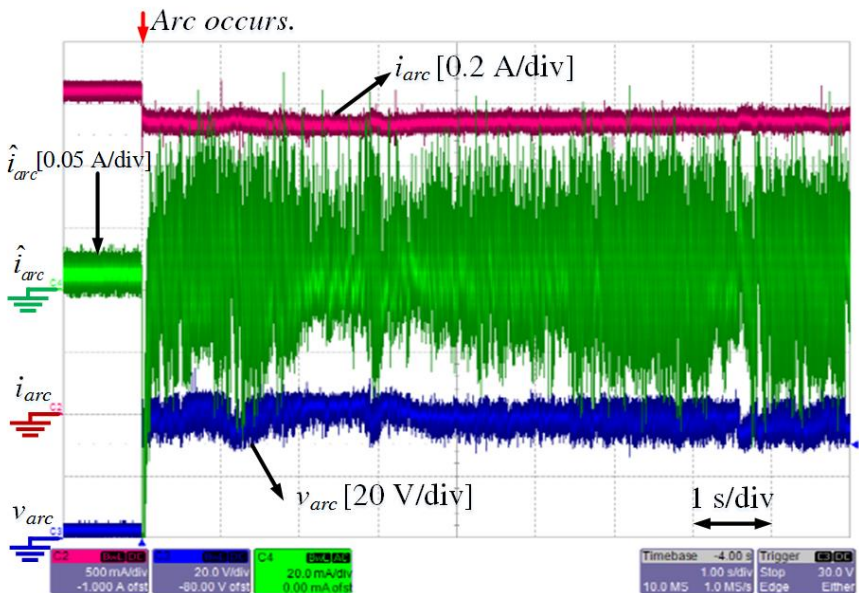


그림 A.7 아크 전류 2.5 A, 전극간격 1.6 mm 조건의 실험파형.

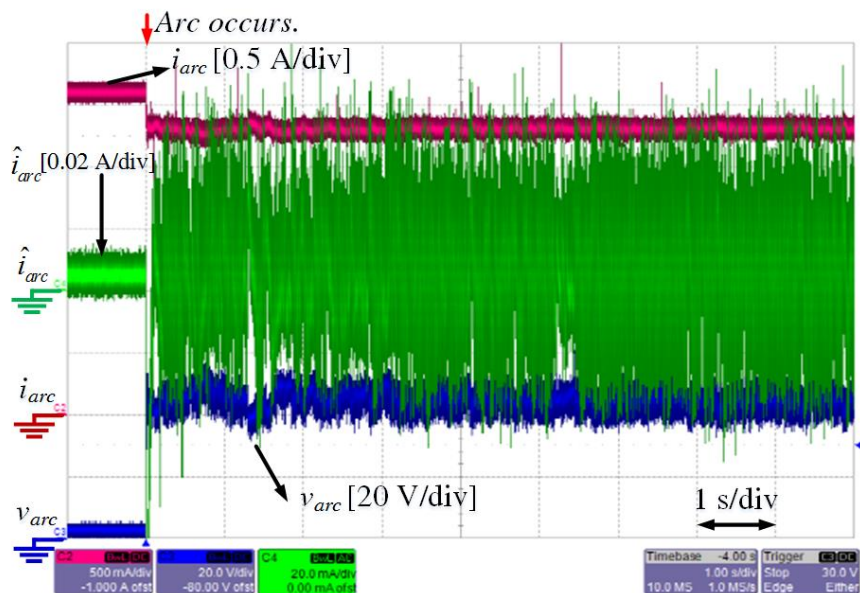


그림 A.8 아크 전류 2.5 A, 전극간격 2.4 mm 조건의 실험파형.

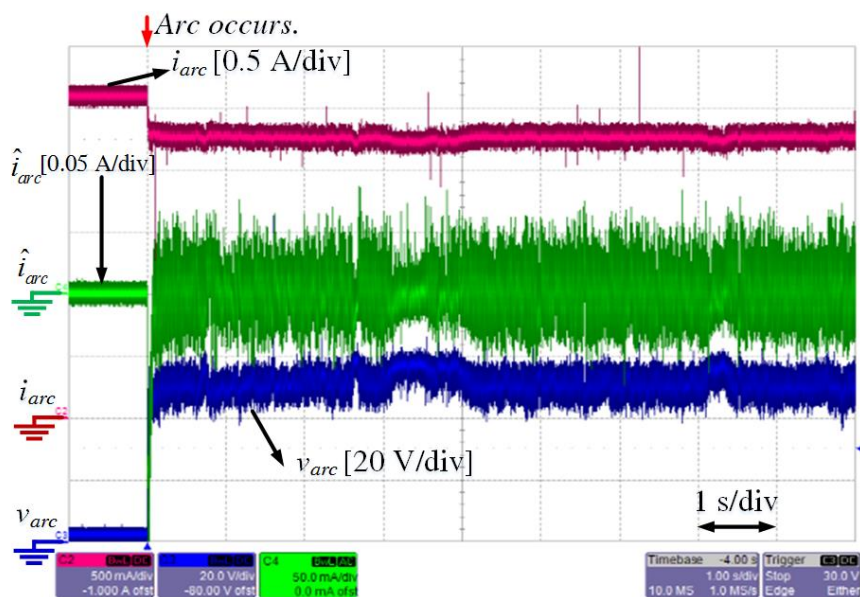


그림 A.9 아크 전류 2.5 A, 전극간격 3.2 mm 조건의 실험파형.

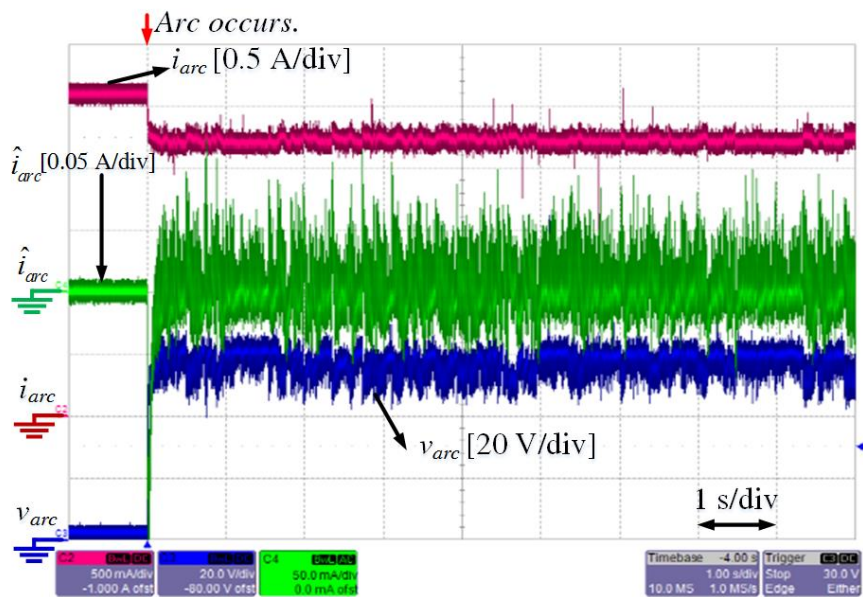


그림 A.10 아크 전류 2.5 A, 전극간격 4.0 mm 조건의 실험파형.

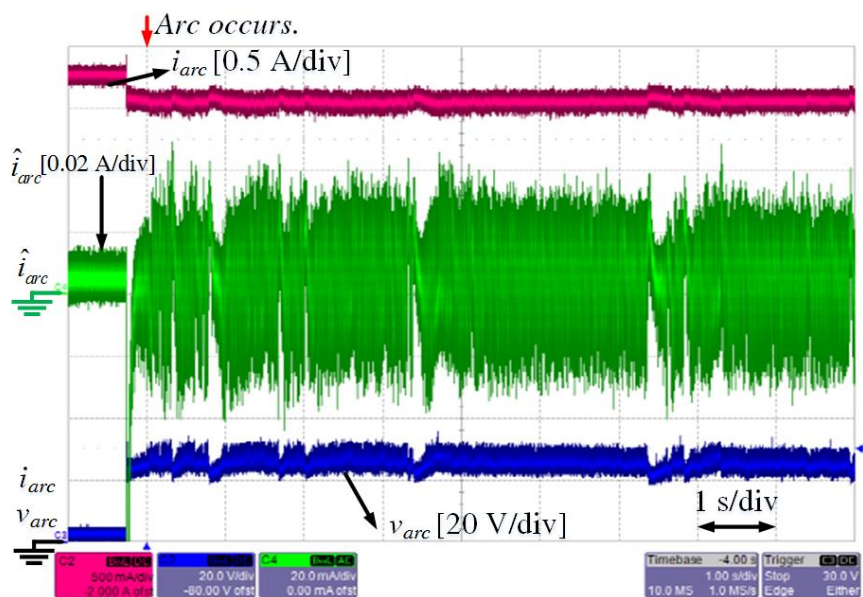


그림 A.11 아크 전류 3.75 A, 전극간격 0.8 mm 조건의 실험파형.

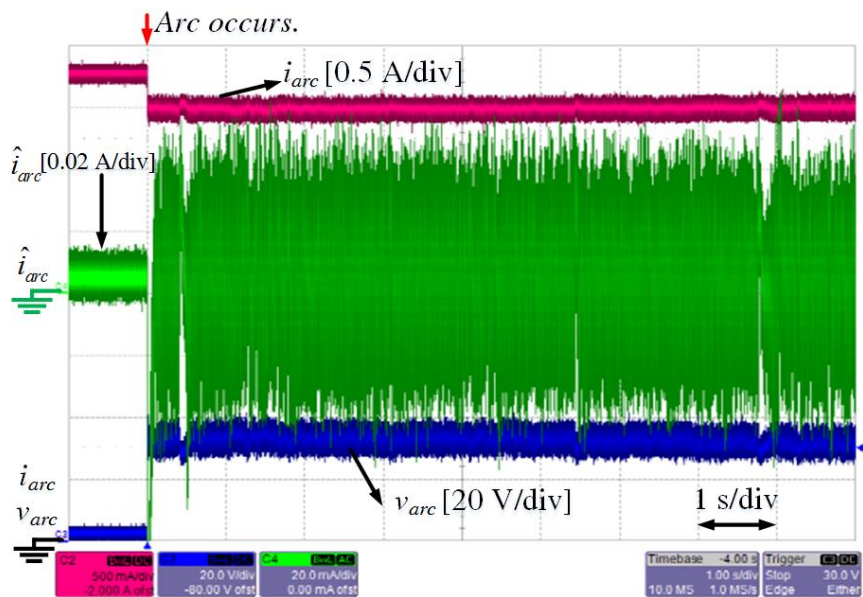


그림 A.12 아크 전류 3.75 A, 전극간격 1.6 mm 조건의 실험파형.

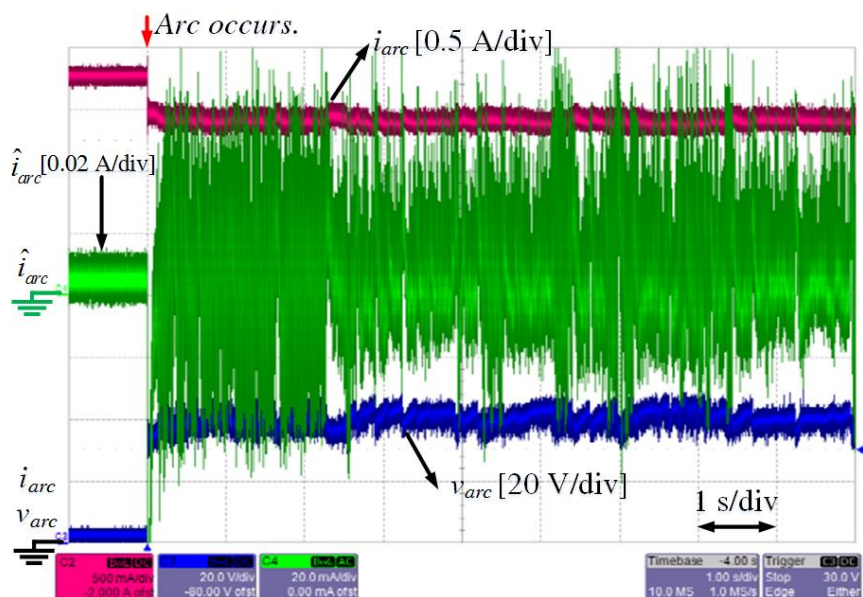


그림 A.13 아크 전류 3.75 A, 전극간격 2.4 mm 조건의 실험파형.



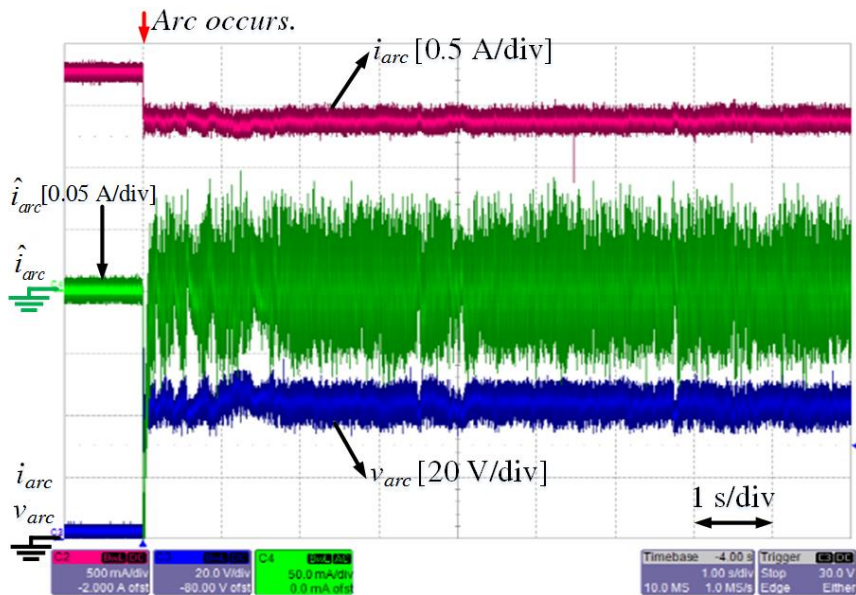


그림 A.14 아크 전류 3.75 A, 전극간격 3.2 mm 조건의 실험파형.

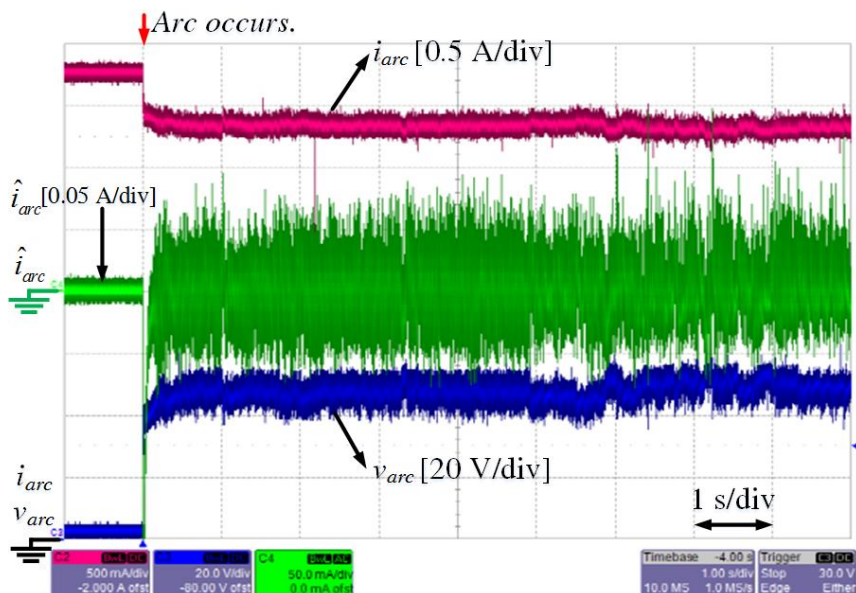


그림 A.15 아크 전류 3.75 A, 전극간격 4.0 mm 조건의 실험파형.

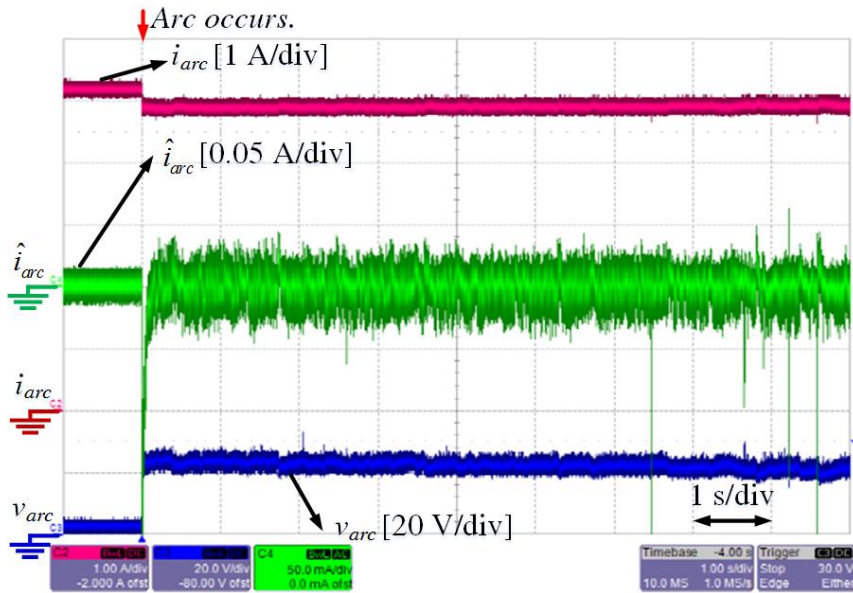


그림 A.16 아크 전류 5A, 전극간격 0.8mm 조건의 실험파형.

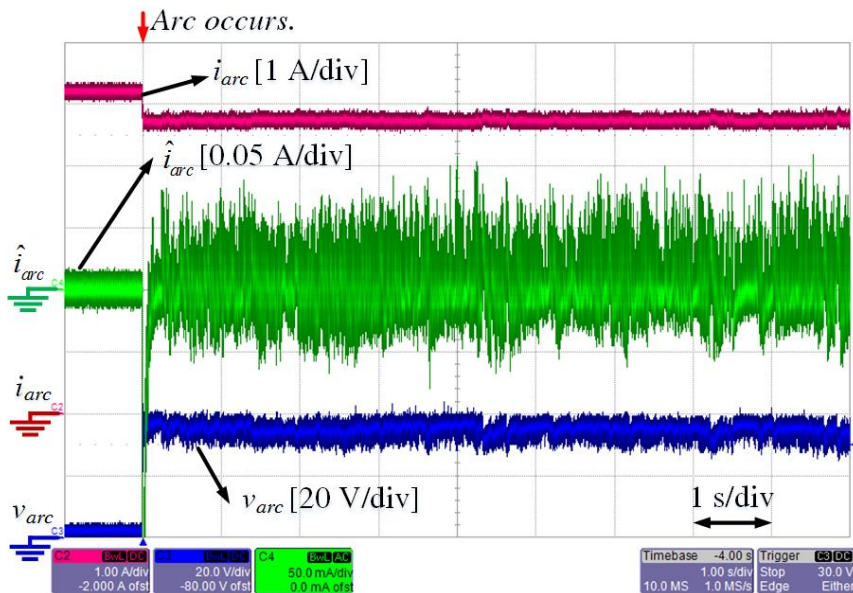


그림 A.17 아크 전류 5 A, 전극간격 1.6 mm 조건의 실험파형.

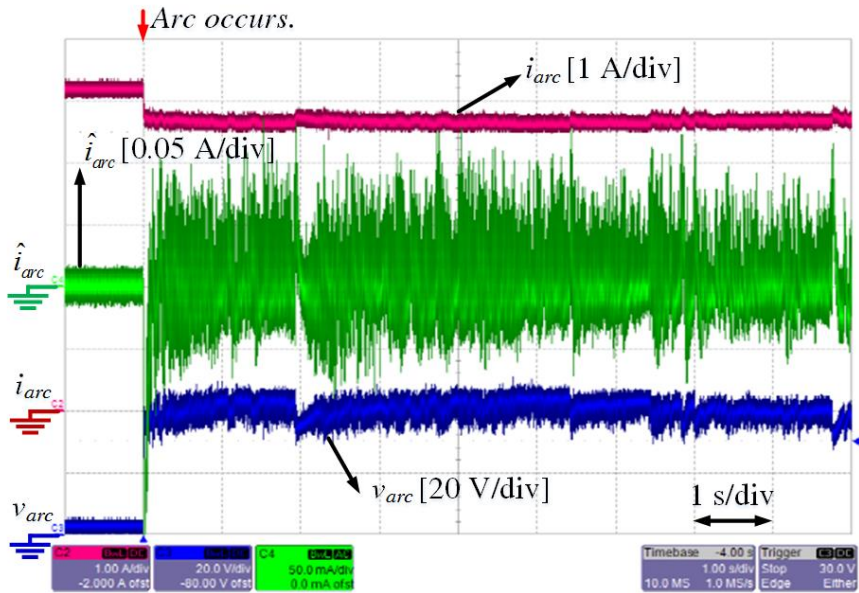


그림 A.18 아크 전류 5 A, 전극간격 2.4 mm 조건의 실험파형.

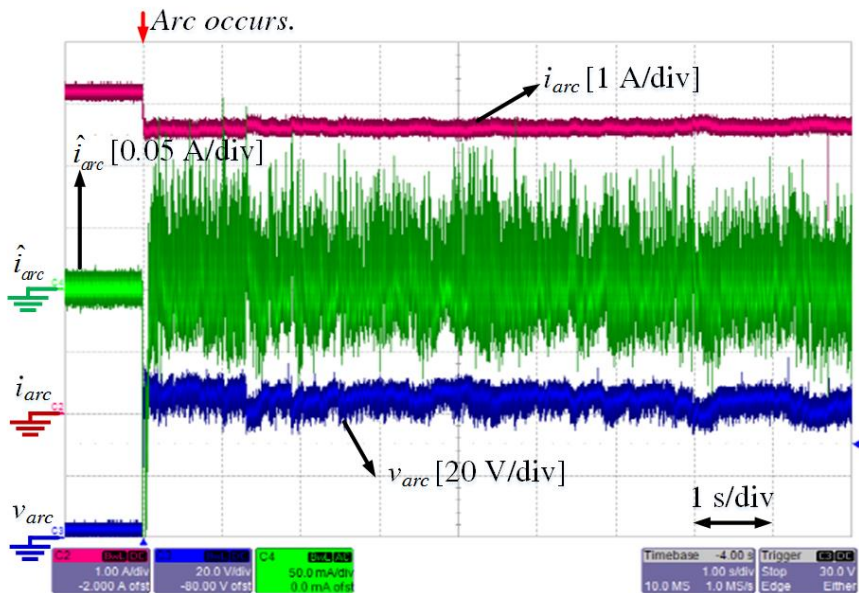


그림 A.19 아크 전류 5 A, 전극간격 3.2 mm 조건의 실험파형.

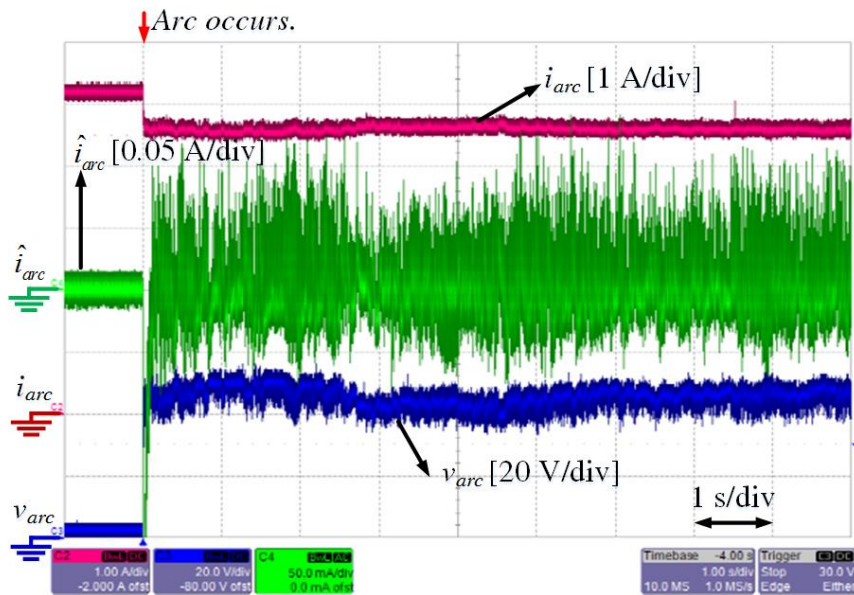


그림 A.20 아크 전류 5 A, 전극간격 4.0 mm 조건의 실험파형.



## A.2 아크사고 변수와 대역별 전류 PSD의 상관관계

A.2는 2.2.4.2.2에서 일부 제시한 전류의 전력 스펙트럼 밀도의 대역별 데이터와 아크사고 변수 간의 상관관계 그래프를 보인다. 그림 A.21, 그림 A.22, 그림 A.23은 아크 전류 변화에 따른 밴드#1, 밴드#2, 밴드#3의 아크 전류 전력 스펙트럼 밀도의 분포를 각각 나타낸다. 모든 밴드에서 전류가 증가하면서 스펙트럼 밀도가 증가하는 경향을 보이지만 데이터의 산포가 크기 때문에 명확한 상관관계로 판단할 수 없다. 또한, 그림 2.21에 나타난 것처럼 실험 조건의 특성상 같은 전극간격 조건에서 전류가 클수록 아크사고의 전력이 커지기 때문에 예측 가능한 결과이다.

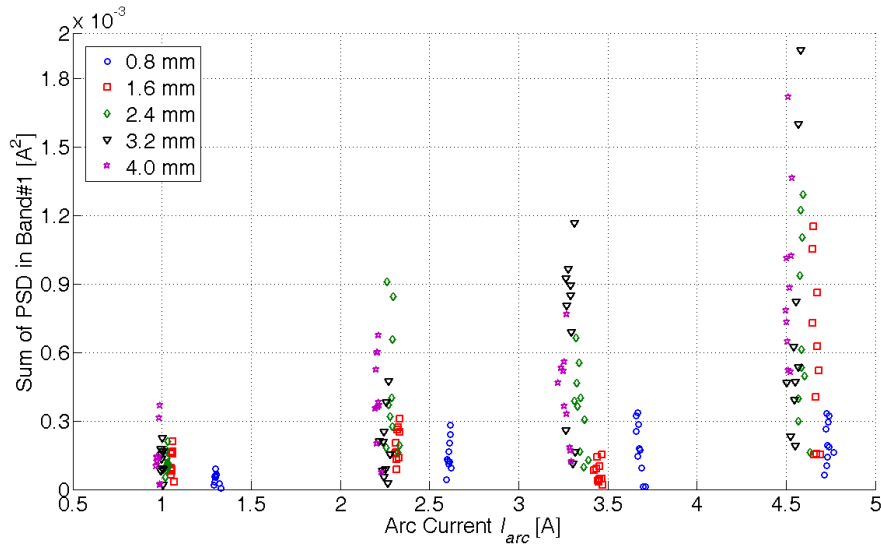


그림 A.21 아크 전류 변화에 따른 밴드#1 전류 PSD 변화.

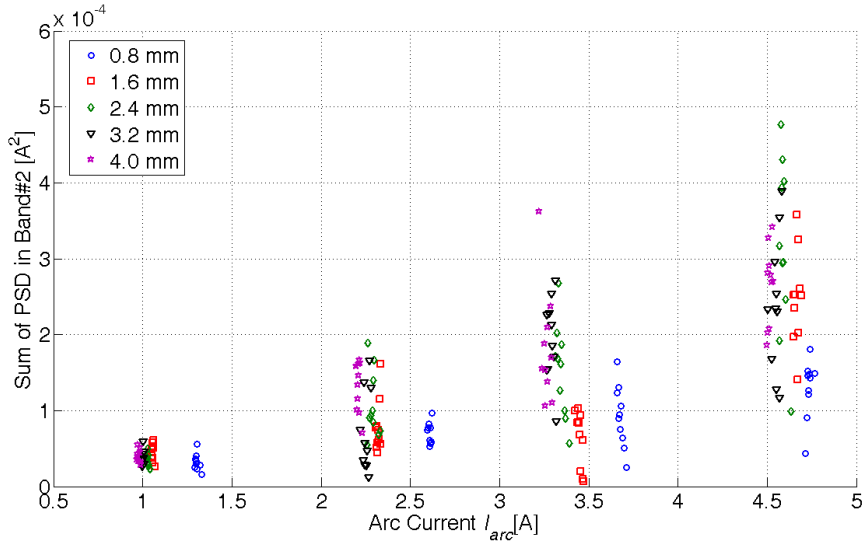


그림 A.22 아크 전류 변화에 따른 밴드#2 전류 PSD 변화.

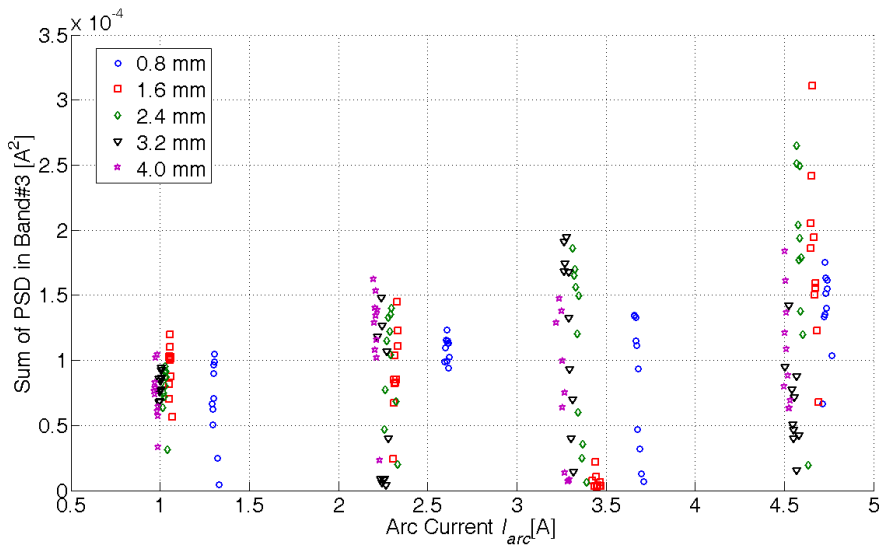


그림 A.23 아크 전류 변화에 따른 밴드#3 전류 PSD 변화.

그림 A.24, 그림 A.25, 그림 A.26은 아크 전압 변화에 따른 밴드#1, 밴드#2, 밴드#3의 아크 전류 전력 스펙트럼 밀도의 분포를 각각

나타낸다. 2장에서 논의한 것처럼 아크 전압과 전력 스펙트럼 밀도는 모든 대역에서 아주 낮은 상관관계를 가져, 아크검출기에 사용되기 어렵다.

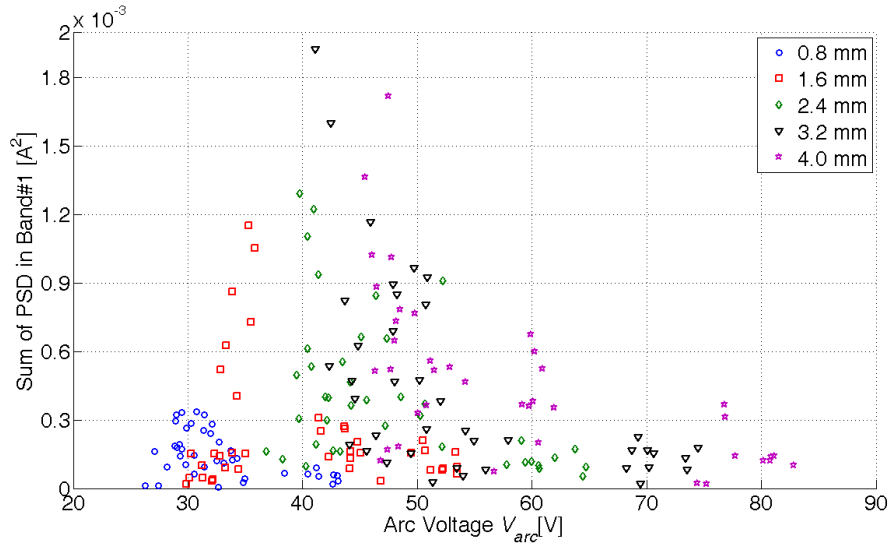


그림 A.24 아크 전압 변화에 따른 밴드#1 전류 PSD 변화.

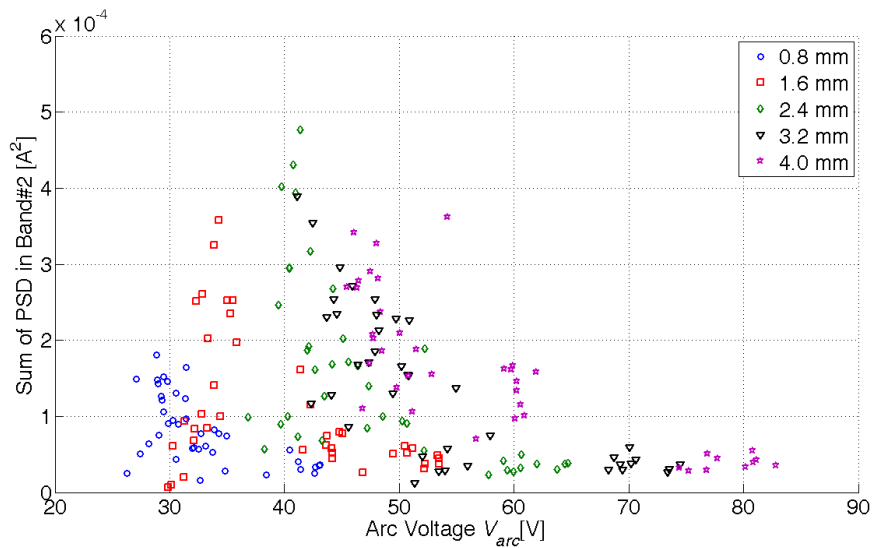


그림 A.25 아크 전압 변화에 따른 밴드#2 전류 PSD 변화.

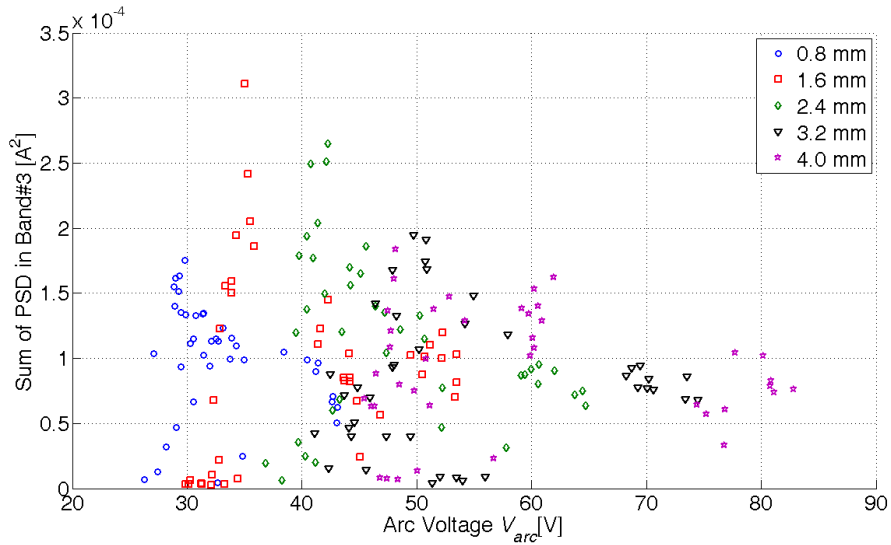


그림 A.26 아크 전압 변화에 따른 밴드#3 전류 PSD 변화.

그림 A.27, 그림 A.28, 그림 A.29는 아크 전력 변화에 따른 밴드#1, 밴드#2, 밴드#3에 해당하는 전력 스펙트럼 밀도의 분포를 각각 나타낸다. 표 2.8에 따라 비교적 높은 상관관계를 가지는 것으로 판단할 수 있지만, 그림에 보인 것처럼 데이터의 산포가 커 정확한 아크사고의 규모를 판단하기에는 무리가 있다.

A.2는 주파수 대역별 전력 스펙트럼 밀도 데이터를 통한 아크사고의 규모 예측 가능성 논의에 대한 데이터를 제시하였다. 앞서 논의한 것처럼 밴드#1의 데이터는 상용전원의 고조파에 해당하는 대역으로 주변 환경의 영향을 받기 때문에 아크사고 검출에 활용되기 어렵다. 밴드#2와 밴드#3은 비교적 주변 환경의 영향이 적지만 직류 마이크로그리드 환경에서 각각 수 kHz 및 수십 kHz로 구동되는 전동기 부하 또는 전력변환기 부하가 연결될 수 있으므로 3장에서 논의한 것과 같은 노이즈 억제 대책이 필요하다.

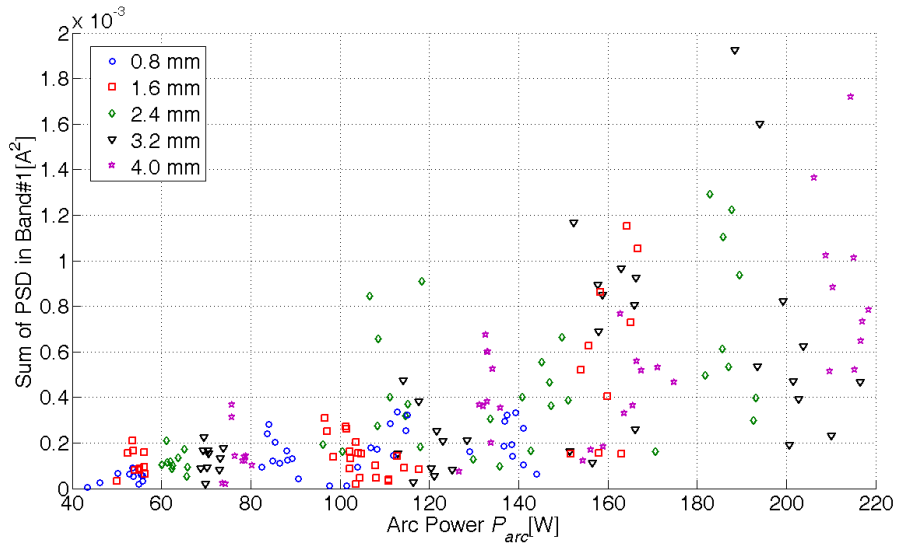


그림 A.27 아크 전력 변화에 따른 밴드#1 전류 PSD 변화.

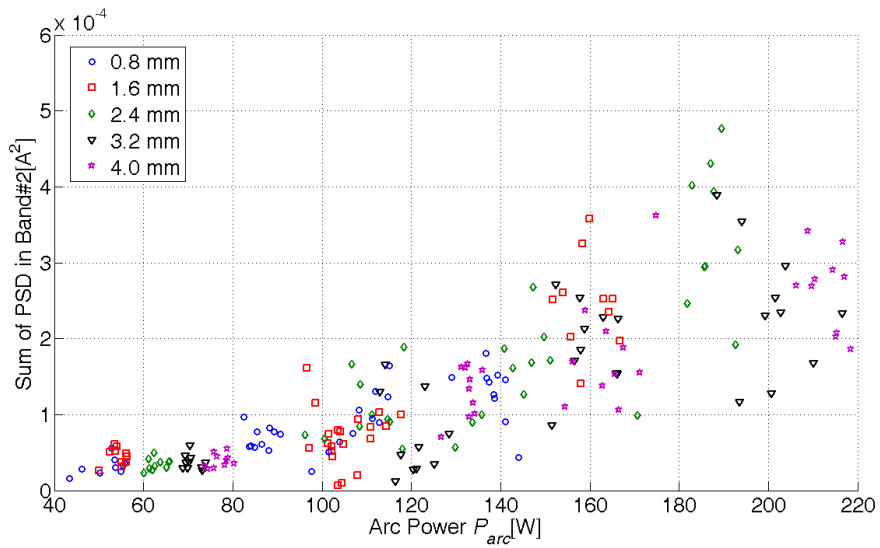


그림 A.28 아크 전력 변화에 따른 밴드#2 전류 PSD 변화.

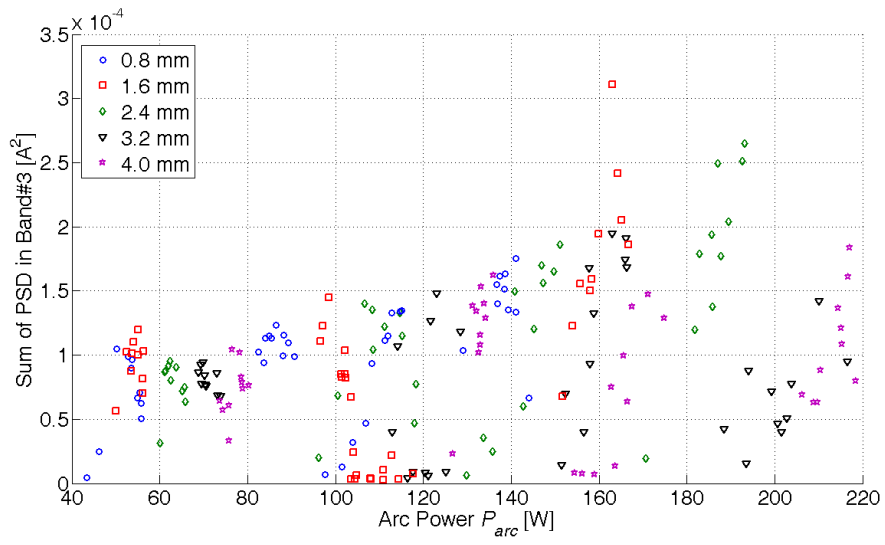


그림 A.29 아크 전력 변화에 따른 밴드#3 전류 PSD 변화.

## ABSTRACT

# Study on Series Arc Fault Detection for DC Microgrids

Gab–Su Seo

Department of Electrical Engineering and Computer Science

The Graduate School

Seoul National University

DC Microgrids using LVDC (Low Voltage Direct Current) and MVDC (Medium Voltage Direct Current) have been taken lots of attention as they are considered to be an effective solution to interface a variety of distributed generation (DG), energy storage devices, and electric loads. DC power networks are beneficial for higher conductor efficiency and higher power conversion efficiency with the same level of voltage compared to AC ones. In addition, they do not require phase and frequency synchronization between the system components, which highly reduces the system complexity. Due to its advantages, DC has been considered for data centers, commercial buildings, and ships.

Despite the merits of DC, it is not widely used yet because DC lacks zero crossing of current that makes it difficult to cut off the current and that causes safety issues. While AC system has been used for more

than one hundred years and, therefore, the AC power networking technology is mature, DC system only has been used in limited areas which necessitates the development of a new protection scheme for DC to maximize its benefit and to spread its application.

Among the three main faults in power systems: short circuit, ground, and arc faults, the arc faults pose an urgent threat because it is difficult to detect by using a conventional circuit breakers. In addition, as the DC arc is not likely to self-extinguish but likely to cause a fire accident at any electric connection, arc protection for DC Microgrids with remote system components such as DG units is indispensable. In this manner, this dissertation discusses the arc fault detection for DC Microgrids. Specifically, this paper focuses on the series arc fault detection considering its detection difficulty and its high probability.

First, this research analyzes the electrical characteristics of an arc. Under 380 VDC condition, arc fault experiments at various current level ranging from 1.25 to 5 A and electrode distance ranging from 0.8 to 4.0 mm are conducted to characterize the relationships among the arc variables: voltage, current, power, and electrode distance. An arc generator complying with UL1699B is used to conduct the experiments. This paper recognizes the DC characteristic of arcing, relationship between averaged variables. However, as an independent device, the arc fault detector (AFD) cannot directly acquire the arc voltage and gap information, but it can only monitor the current at the point of installation. As a result, it is not possible to determine the



occurrence of arc from only the DC characteristic.

Second, AC characteristic of arc and its applicability to AFD is discussed. The AC feature of arc is analyzed by the fast Fourier transform (FFT) of arc current. In this paper, the frequency spectrum is divided into four bands and two of them can be used for AFD considering the signal level difference between normal and arcing condition and effect of noise; band#2 ranging from 1–10 kHz and band#3 from 10–150 kHz. Although the analysis finds out the correlation between the arc parameters is not significant due to their scattering distribution, the arc signal has significant difference in the signal strength from normal signal which implies its possibility for AFD.

As the strength of arc signal is not constant but chaotic, this dissertation employs statistical method to derive an AFD method. If the data follow normal distribution, one can guarantee the detection reliability of an AFD referring to its probability distribution. If the data does not follow normal distribution, it should be normalized by a transformation technique such as Box–Cox or Johnson transform. As a result, the detection threshold can be determined by a graphical approach displaying probability curves of false–tripping (false–positive) and detection failure (false–negative) to meet the system requirement. Also, limitations of the detection are recognized and the fault detection strategy can be established to optimize the detection failure and nuisance tripping probability that are in trade–off.

Simply using the frequency features of arcing is likely to be

successful in a simple power system such as PV generation because it has limited number of system components and is unlikely to expand. However, an intelligent AFD is required for the DC Microgrids since it comprises a variety of DGs and unknown loads and they are likely to expand. Therefore, it is important to suppress the false tripping of AFD caused by the operation of power circuits. This dissertation analyzes the effect of power circuits on the AFD operation and proposes a new method to reduce the frequency interference of power circuits and to maintain the designed AFD reliability. The proposed AFD algorithm distinguishes the operation of power circuits and, therefore, highly reduce false-positive in normal condition.

To verify the feasibility of the proposed AFD method, a prototype is implemented according to the proposed design guideline. The experiments validate not only the arc fault detection in resistive loads, but also the performance to avoid false-tripping in the presence of power circuits. Through the statistical analysis, the detection reliability of the prototype AFD is 99.999% and it has 10 ppm of detection failure and 270 ppm of false-tripping probability. Besides, it provides a methodology to statistically solve a problem which cannot be mathematically interpreted like arcing.

**Keywords :** DC protection, arc fault detection, series arc, Microgrids

**Student Number :** 2010-30221